

М. Г. Киселев
А. В. Дроздов
Д. А. Ямная

ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ
ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
С ВЫНУЖДЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ЗАГОТОВКИ

Минск
БНТУ
2017

УДК 621.921.34:621.93+621.9.048.6

Киселев, М. Г. Технология механического распиливания хрупких неметаллических материалов с вынужденными колебаниями заготовки / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная. – Минск : БНТУ, 2017. – 393 с. – ISBN 978-985-583-158-8.

Монография посвящена вопросам исследования и разработки технологий и оборудования для механического распиливания хрупких неметаллических материалов при сообщении заготовке вынужденных колебаний различных направлений и интенсивности. Приведены данные, отражающие влияние колебаний, сообщаемых заготовке, на производительность выполнения операции и качество поверхностей распиленных полуфабрикатов. Приведены описания оборудования и технологий с использованием различных типов вибраторов для сообщения заготовке вынужденных колебаний.

Издание предназначено для специалистов, занимающихся обработкой хрупких неметаллических материалов, в частности, механическим распиливанием, а также читателей, интересующихся вопросами практического применения вибрационной техники и технологий. Монография может представлять интерес для студентов первой и второй ступени высшего образования, а также аспирантов, обучающихся по технологическим специальностям.

Табл. 21. Ил. 178.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол №9 от 30.10.2017)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В. Л. Ланин*;
доктор технических наук, доцент *В. И. Жорник*

ISBN 978-985-583-158-8

© М. Г. Киселев, А. В. Дроздов,
Д. А. Ямная, 2017

© Белорусский национальный
технический университет, 2017

Содержание

Введение.....	9
1. СПОСОБЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	11
1.1. Назначение операции распиливания и предъявляемые к ней требования.....	11
1.2. Способ распиливания алмазным отрезным кругом	11
1.2.1. Способ распиливания алмазным кругом с внутренней режущей кромкой (АКВР).....	14
1.3. Способ распиливания алмазной бесконечной ленточной пилой.....	28
1.4. Способ абразивного распиливания полотнами (штрипсами)....	30
1.5. Способ абразивного распиливания проволокой.....	34
1.6. Характеристика технологической операции механического распиливания кристаллов алмаза.....	43
1.6.1. Назначение, применяемое оборудование и требования, предъявляемые к операции распиливания кристаллов алмаза.....	43
1.6.2. Влияние режимов распиливания на производительность и качество обработанных кристаллов алмаза	48
1.6.3. Современные представления о механизме разрушения кристалла алмаза в процессах механической обработки.....	50
1.6.4. Особенности механизма разрушения кристалла алмаза в процессе его распиливания.....	54
1.7. Основные направления совершенствования операции механического распиливания кристаллов алмаза	56
1.7.1. Автоматизация процесса механического распиливания кристаллов алмаза	57
1.7.2. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков	59
1.7.3. Применение внешнего электрического поля для интенсификации процесса механического распиливания кристаллов алмаза	61
1.7.4. Совершенствование оборудования для механического распиливания кристаллов алмаза по традиционной технологической схеме	64

1.7.5. Применение вынужденных колебаний в процессе распиливания материалов.....	71
1.7.5.1. Применение ультразвуковых и низкочастотных колебаний в процессе разрезания материалов лезвийным инструментом.....	71
1.7.5.2. Применение ультразвуковой размерной обработки для распиливания хрупких неметаллических материалов	76
2. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	83
2.1. Теоретические исследования влияния ультразвуковых колебаний на основные показатели процесса механического распиливания хрупких неметаллических материалов	85
2.1.1. Прогнозирование эффектов ультразвукового воздействия на процесс механического распиливания хрупких неметаллических материалов	86
2.1.2. Обоснование рационального направления и способа введения ультразвуковых колебаний в зону распиливания.....	87
2.1.3. Теоретическая оценка степени влияния ультразвука на повышение производительности операции механического распиливания кристаллов алмаза.....	97
2.1.4. Теоретическая оценка степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления в процессе распиливания	110
2.1.5. Влияние ультразвуковых колебаний на условия формирования шероховатости распиленной поверхности кристалла алмаза.....	125
2.2. Методика проведения экспериментальных исследований влияния ультразвуковых колебаний на процесс распиливания хрупких неметаллических материалов.....	133
2.2.1. Экспериментальная установка с контрольно-измерительным комплексом, примененные в исследованиях	133
2.2.2. Материалы, образцы и инструменты, примененные в исследованиях	142
2.2.3. Ультразвуковое оборудование, примененное в исследованиях	147
2.2.4. Последовательность выполнения экспериментальных исследований.....	148
2.3. Экспериментальные исследования процесса распиливания хрупких неметаллических материалов с ультразвуком.....	151

2.3.1. Влияние ультразвука на интенсивность распиливания	152
2.3.2. Влияние ультразвуковых колебаний на снижение сил сопротивления в процессе распиливания.....	163
2.3.3. Влияние ультразвуковых колебаний на шероховатость поверхности площадок распиленных заготовок.....	169
2.3.4. Влияние ультразвука на температурный режим процесса распиливания	176
2.4. Разработка станочного оборудования для механического распиливания хрупких неметаллических материалов с ультразвуком	182
2.4.1. Анализ схем введения ультразвуковых колебаний и определение оптимального варианта конструкции распиловочной секции	182
3. ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОЦЕССЕ РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	197
3.1. Обоснование выбора рационального типа вибратора для распиливания сверхтвердых кристаллов.....	197
3.1.1. Вибратор с возбуждением колебаний при помощи электромагнитной диафрагмы.....	198
3.1.2. Вибратор с возбуждением колебаний при помощи центробежного вибратора.....	204
3.2. Экспериментальные исследования процесса распиливания хрупких неметаллических материалов с использованием центробежного вибратора.....	210
3.2.1. Инструмент, материалы и образцы, примененные в исследованиях	210
3.3. Методы и средства измерения основных параметров процесса распиливания	212
3.4. Последовательность выполнения экспериментов	216
3.5. Теоретические исследования процесса механического распиливания сверхтвердых кристаллов в условиях виброударного режима распиливания	220
3.5.1. Разработка математической модели для исследования кинематики и динамики взаимодействия элементов колебательной системы «заготовка–распиловочный диск»	222

3.5.2. Исследование динамики взаимодействия обрабатываемой заготовки с инструментом в условиях виброударного режима распиливания	232
3.5.3. Теоретическая оценка степени влияния виброударного режима на интенсивность распиливания сверхтвердых кристаллов.....	236
3.5.4. Исследование особенностей механизма разрушения хрупких материалов в условиях виброударного режима распиливания.....	241
3.6. Экспериментальные исследования процесса распиливания сверхтвердых кристаллов с применением центробежного вибратора.....	246
3.6.1. Влияние виброударного режима распиливания на производительность обработки заготовок из синтетического корунда	246
3.6.2. Влияние виброударного режима распиливания на шероховатость обработанной поверхности	255
3.6.3. Влияние виброударного режима взаимодействия обрабатываемой заготовки с распиловочным диском на шероховатость распиленной поверхности сверхтвердых кристаллов.....	260
3.6.4. Оценка влияния сил заклинивания распиловочного диска на качество обработанной поверхности	269
3.6.5. Влияние виброударного режима распиливания на характер износа режущего инструмента	272
4. ТЕХНОЛОГИЯ РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗАГОТОВКИ.....	280
4.1. Методика проведения экспериментальных исследований.....	280
4.1.1. Разработка технологической схемы и создание конструкции распиловочной секции, обеспечивающей двухмерное циркуляционное движение заготовки	280
4.1.2. Определение исходных параметров колебательной системы экспериментальной распиловочной секции.....	287
4.1.3. Определение рационального варианта колебательной системы экспериментальной распиловочной секции.....	295
4.1.3.1. Разработка методики измерения параметров циркуляционного движения заготовки.....	295

4.1.3.2. Экспериментальная оценка влияния условий и режимов возбуждения колебательной системы распиловочной секции на параметры циркуляционного движения заготовки	297
4.1.3.3. Методика определения силовых и временных параметров контактного взаимодействия заготовки с режущей кромкой диска	301
4.1.4. Материалы, образцы и инструменты, примененные в исследованиях	305
4.1.5. Последовательность выполнения экспериментов	307
4.1.6. Методика обработки экспериментальных данных	308
4.2. Теоретико-экспериментальные исследования влияния циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания и качество обработанных поверхностей	311
4.2.1. Математическое описание траектории циркуляционного движения заготовки при сообщении узлу качания стрелы вынужденных колебаний	311
4.2.2. Влияние параметров циркуляционного движения заготовки на кинематику и динамику ее взаимодействия с распиловочным диском	321
4.2.3. Теоретическая оценка влияния циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания	324
4.2.4. Теоретико-экспериментальные исследования влияния циркуляционного движения заготовки на повышение качества обработанной поверхности	332
4.2.4.1. Теоретическая оценка влияния циркуляционного движения заготовки на величину пути ее скольжения относительно диска за время распиливания	333
4.2.4.2. Математическое и физическое моделирование траектории перемещения точки, принадлежащей заготовке, на боковой поверхности диска	340
4.3. Экспериментальные исследования процесса механического распиливания хрупких неметаллических материалов с циркуляционным движением заготовки	350
4.3.1. Влияние режимов обработки на интенсивность распиливания образцов	351
4.3.2. Влияние режимов распиливания образцов на качество их обработанных поверхностей	360

4.4.1. Создание распиловочной секции с управляемым циркуляционным движением заготовки.....	367
4.4.2. Особенности выполнения технологической операции механического распиливания хрупких неметаллических материалов	370
4.4.3. Определение рациональных режимов выполнения операции механического распиливания хрупких неметаллических материалов с циркуляционным движением заготовки.....	371
4.4.4. Последовательность и содержание технологических переходов выполнения операции механического распиливания хрупких неметаллических материалов с использованием модернизированной распиловочной секции	374
4.4.5. Экспериментальная оценка эффективности применения разработанной технологии механического распиливания хрупких неметаллических материалов с использованием модернизированной распиловочной секции	375
Список использованных источников.....	378

Введение

Операция механического распиливания исходного сырья из хрупких неметаллических материалов на штучные заготовки широко используется в технологии оптического и электронного приборостроения, а также в ювелирном производстве. В зависимости от формы и размеров исходного сырья, его физико-механических свойств и стоимости применяется несколько технологических схем ее выполнения. Так, распиливание слитков монокристаллов полупроводниковых материалов на пластины, а также штабиков оптического стекла осуществляется с помощью алмазных отрезных кругов с внешней или внутренней режущими кромками. Для распиливания слитков больших размеров используется многопроволочная резка, где в качестве инструмента используется тонкая диаметром 0,02–0,03 мм стальная или вольфрамовая проволока с подачей в зону обработки свободного абразива.

Тонкие (толщиной 0,2–0,3 мм) стальные полотна – штрипсы применяются для распиливания исходных заготовок из дорогостоящих материалов, когда в ущерб производительности необходимо обеспечить минимальные потери исходного сырья. Осуществляется обработка набором штрипс, закрепленных в рамке, совершающей относительно заготовки возвратно-поступательное движение с подачей в зону распиливания абразивной суспензии.

К операции распиливания предъявляются следующие основные требования: высокая производительность ее выполнения, минимально возможная для данной технологической схемы толщина распила, а также высокие геометрическая точность и качество распиленной поверхности штучной заготовки. Последних два требования имеют принципиально важное значение при распиливании исходных заготовок из дорогостоящего сырья и продиктованы условием минимизации его безвозвратных потерь как на данной операции, так и на последующей операции шлифования полученных после распиливания поверхностей штучных заготовок.

С точки зрения уровня обеспечения этих требований, а также трудоемкости и сложности выполнения данной операции на первом месте стоит операция механического распиливания кристаллов алмаза. Она выполняется для разделения их на части (полуфабрикаты) при производстве бриллиантов и других изделий с целью радио-

нального использования дорогостоящего сырья. Достигается это в результате того, что из одного монокристалла алмаза изготавливаются два бриллианта, суммарная масса которых значительно превышает массу бриллианта, полученного из монокристалла в его исходном состоянии, т.е. без применения операции распиливания. Если учесть, что стоимость бриллианта связана кубической зависимостью с его массой, то первостепенной задачей при переработке монокристаллов алмаза в такие изделия является минимизация безвозвратных потерь исходного сырья, т.е. обеспечение максимального процента выхода годного. В этой связи актуальной для алмазообрабатывающего производства по-прежнему остается задача совершенствования технологии распиливания кристаллов алмаза с целью повышения как производительности выполнения операции, так и качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов.

Весьма перспективным направлением успешного решения этой задачи является использование в процессе распиливания вынужденных колебаний, сообщаемых обрабатываемой заготовке. Вместе с тем, несмотря на большие потенциальные возможности использования вынужденных колебаний с целью повышения технологических показателей процесса распиливания хрупких неметаллических материалов, до настоящего времени остались без должного внимания вопросы эффективности применения на этих операциях колебательных систем, обеспечивающих управляемый виброударный режим распиливания.

В настоящей монографии приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований проведенных на кафедре «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета под руководством доктора технических наук, профессора Киселева М. Г., посвященных изучению влияния виброударных колебательных систем различного типа на технологические показатели процесса распиливания хрупких неметаллических материалов.

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность рецензентам доктору технических наук, профессору Ланину В.Л., и доктору технических наук, доценту Жорнику В.И. за ценные указания и предложения при подготовке рукописи данной монографии.

1. СПОСОБЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Назначение операции распиливания и предъявляемые к ней требования

Операция механического распиливания исходного сырья из хрупких неметаллических материалов выполняется с целью его разделения на штучные заготовки. Она широко применяется в технологии оптического и электронного приборостроения, а также в ювелирном производстве. В отличие от токопроводящих материалов, для разделения которых помимо механического могут быть эффективно использованы электроэрозионный и электрохимический методы обработки [1–3], распиливание неметаллических материалов осуществляется, как правило, путем их механической обработки.

К операции распиливания предъявляются следующие основные требования: высокая производительность ее выполнения, минимально возможная для данной технологической схемы толщина распила, а также высокие геометрическая точность и качество распиленной поверхности штучной заготовки. Два последних требования имеют принципиально важное значение при распиливании исходных заготовок из дорогостоящего сырья и продиктованы условием минимизации его безвозвратных потерь как на данной операции, так и на последующей операции шлифования полученных после распиливания поверхностей штучных заготовок.

В зависимости от формы и размеров исходного сырья, его физико-механических свойств и стоимости в настоящее время применяются несколько способов его механического распиливания, краткая характеристика которых приведена ниже.

1.2. Способ распиливания алмазным отрезным кругом

Это универсальный способ, который широко применяется при разделке исходных заготовок на пластины как одиночным кругом, так и пакетом кругов по групповой технологии [4]. В основе процесса распиливания алмазным отрезным кругом (далее по тексту – АОК) лежит сложный механизм хрупкого разрушения, сопровожда-

емый частичным пластическим деформированием с образованием трещин в виде конусных поверхностей и скалыванием частиц материала под действием алмазных зерен, закрепленных в металлической связке отрезного круга.

Для распиливания блоков и больших кусков стекла, полученных после развалки сосуда, используют алмазные отрезные сегментные круги формы АПСД по ГОСТ 32833-2014 (рисунок 1.1а).

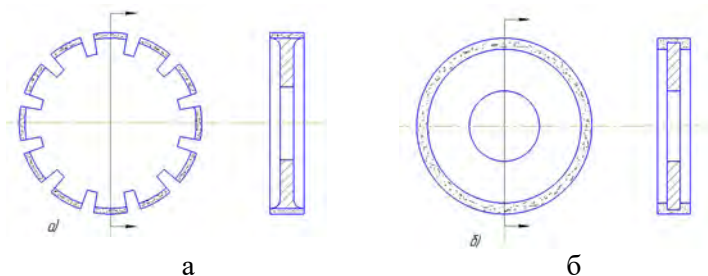


Рис. 1.1. Алмазные отрезные круги для распиливания стекла: а – сегментные круги формы АПСД; б – круги со сплошной режущей кромкой формы АОК

Режущая кромка кругов составлена из отдельных алмазосодержащих сегментов, припаянных к несущей поверхности. Диаметр кругов от 250 до 2000 мм, при толщине от 2,5 до 12,5 мм. Используется алмазный порошок марки А1 зернистостью от 400/315 до 650/500. Относительная концентрация алмаза в алмазосодержащем слое от 25 до 100%. Корпус изготавливается из стали различных марок (60Г, 65Г, 9ХФ и др.). Число сегментов зависит от диаметра круга и составляет от 23 до 115. Сегменты припаивают к корпусу серебряными или другим припоем, исключающим графитизацию алмазов и нарушение физико-механических свойств связки. Круги представляют собой диски из холоднокатаной стали марки 08кп, по периферии которых способом порошковой металлургии или гальваностегии закреплен алмазосодержащий слой.

Распиливание стекла в виде кусков и пластин выполняют алмазными отрезными кругами формы АОК по ГОСТ 10110-87Е (рисунок 1.1б). Стандарт предусматривает 12 типоразмеров кругов АОК. Они различаются диаметром, шириной и толщиной алмазосодержащего слоя. Диаметр кругов от 50 до 500 мм, а их толщина от 0,15

до 2,4 мм. Профиль алмазосодержащего слоя может быть прямоугольным или трапецидальным. Марки применяемых алмазных порошков: А2, АС15, АС20, АС50. Зернистость от 50/40 до 630/500. Концентрация возрастает от 25 до 100% с увеличением зернистости порошка, которая находится в прямой зависимости от диаметра круга. Стандарт устанавливает и наибольшую зернистость алмазного порошка в зависимости от толщины алмазосодержащего слоя. Так, при его толщине 0,15 мм наибольшая зернистость порошка 63/50, а при толщине 0,6 – 160/125.

Для выполнения операции распиливания могут использоваться плоскошлифовальные станки, когда на шпинделе вместо шлифовального круга устанавливается АОК (рисунок 1.2а), а также специальные распиловочные станки типа К8011, К8805, АОС-200, работающие по принципу гравитационной подачи круга (рисунок 1.2б) с зернистостью алмаза А (АС) 260/200 или 200/163. В этом случае при распиливании заготовок оптических деталей обеспечивается разнотолщинность пластин от 0,5 до 0,4 мм, разброс по толщине в партии до 0,5мм при минимальной толщине от 1 до 1,2мм и шероховатости распиленной поверхности Ra от 1,38 до 3,15мкм. Значительное влияние на плоскостность получаемых пластин оказывает жесткость отрезного круга, которая пропорциональна квадрату отношения его толщины В к диаметру Д ($В/Д$)².

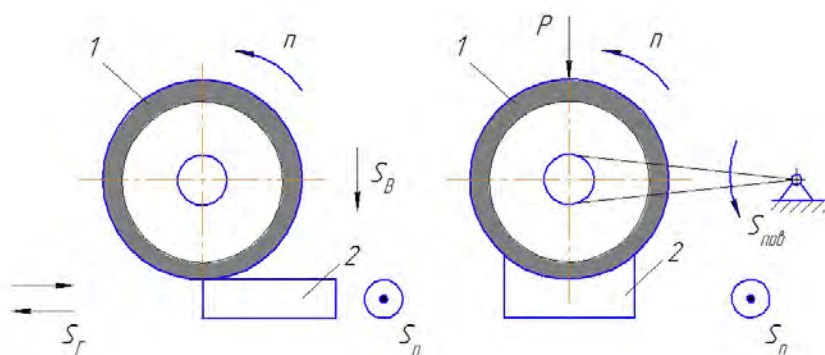


Рис. 1.2. Технологическая схема распиливания алмазным отрезным кругом (АОК):
 а – с поперечной подачей круга; б – с гравитационной подачей (1 – АОК,
 2 – распиливаемая заготовка)

В процессе распиливания первоначально острые углы алмазной кромки диска округляются, силы резания возрастают и при неравномерном износе кромок более острый край диска уводит, что искажает поверхность реза. С уменьшением толщины АОК жесткость инструмента также снижается, под действием сил резания он изгибается в результате чего происходит увод плоскости реза. Так при распиливании кварца соотношение между толщиной В и диаметром Д АОК должно быть от 1/100 до 1/250 при условии диаметра зажимных фланцев $d_{\text{ф}} > (0,4 - 0,6) Д$, в которых АОК должен быть жестко зажат по их наружным краям и иметь практически нулевой зазор в посадочном отверстии шпинделя. Помимо этого, для обеспечения достаточно стабильного процесса резки АОК необходимо применение прецизионных шпинделей с использованием аэроstaticких подшипников и проведения динамической балансировки вращающихся элементов шпиндельного узла.

Основной недостаток способа распиливания АОК связан с его неэкономичностью, особенно при разделке дорогостоящих кристаллов на пластины, что обусловлено значительными безвозвратными потерями кристаллического сырья:

- при толщине пластины $S = 0,4\text{мм}$, ширина реза t составляет $0,55\text{мм}$;
- при $S = 0,6 - 1,0\text{мм}$, $t = 0,7\text{мм}$;
- при $S > 1,0\text{мм}$, $t = 1,0 - 1,2\text{мм}$.

1.2.1. Способ распиливания алмазным кругом с внутренней режущей кромкой (АКВР)

Алмазный круг с внутренней режущей кромкой (АКВР) представляет собой металлический кольцеобразный корпус 1 толщиной $0,05 - 0,2\text{ мм}$ (рисунок 1.3), на внутренней кромке которого закреплены способом гальваностегии алмазные зерна 2, осуществляющие процесс резания.

Корпус изготавливают из высококачественных коррозионно-стойких хромоникелевых сталей с упрочняющими легирующими добавками, в частности из стали 12Х18Н10Т. После закрепления на внутренней кромке алмазных зерен толщина режущей кромки в два-три раза превышает толщину корпуса.

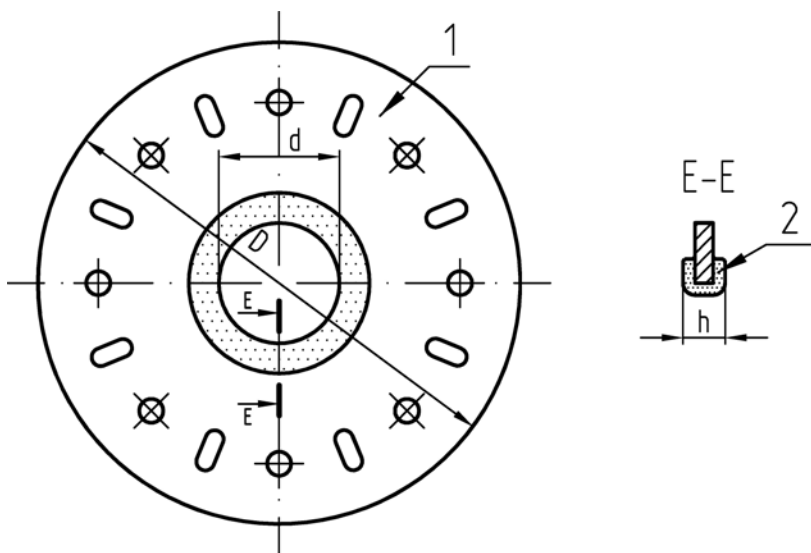






Рис. 1.3. Конструкция алмазного диска с внутренней режущей кромкой:
1 – корпус; 2 – алмазные зерна

Размер алмазных зерен, закрепленных на внутренней кромке, выбирают в зависимости от физико-механических свойств распиливаемого материала [5]. Так, при распиливании кремния целесообразно использовать алмазные зерна с размером основной фракции 40–60 мкм, при распиливании сравнительно мягких полупроводниковых соединений (германий, арсенид галлия, арсенид индия, фосфид галлия и др.) целесообразно использовать алмазные зерна с размером основной фракции 28–40 мкм. Монокристаллы сапфира, корунда, кварца, большинства гранатов распиливают высокопрочными кристаллическими алмазами, размер зерен основной фракции которых составляет 80–125 мкм. В связи с тем, что диаметры слитков и механические свойства разрезаемых материалов разнообразны, применяют круги АКВР различных типоразмеров, характеристики наиболее распространенных из них приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные технические характеристики алмазных отрезных кругов с внутренней режущей кромкой.

Обозначение	Диаметр круга, мм		Толщина, мм		Разрезаемый материал	Максимальный диаметр разрезаемого слитка, мм	Стойкость круга при резке максимального диаметра, количество резцов
	наружный	внутренний	Режущей кромки	корпуса			
АКВР 206 × 83 × 0,2	206	83	0,20	0,10	Кремний	40	500
АКВР 206 × 118 × 0,12	206	118	0,12	0,08	Германий	15	50 000
АКВР 305 × 100 × 0,2	305	100	0,2	0,10	Кремний	60	400
АКВР 422 × 136 × 0,36	422	136	0,36	0,10		100	800
АКВР 422 × 152 × 0,3	422	152	0,3	0,10		76	1 500
АКВР 422 × 152 × 0,45	422	152	0,45	0,20	Сапфир	76	100
АКВР 546 × 184 × 0,32	546	184	0,32	0,12	Кремний	125	800
АКВР 546 × 184 × 0,45	546	184	0,45	0,20	Сапфир	125	100
АКВР 546 × 184 × 0,25	546	184	0,25	0,10	A_2B_3	125	2 000
АКВР 560 × 170 × 0,32	560	170	0,32	0,12	Кремний	150	300
АКВР 597 × 203 × 0,35	597	203	0,35	0,15		150	800
АКВР 690 × 235 × 0,35	690	235	0,35	0,15		150	1 500

Технологическая схема резки полупроводникового слитка кругом АКВР показана на рисунке 1.4 [5].

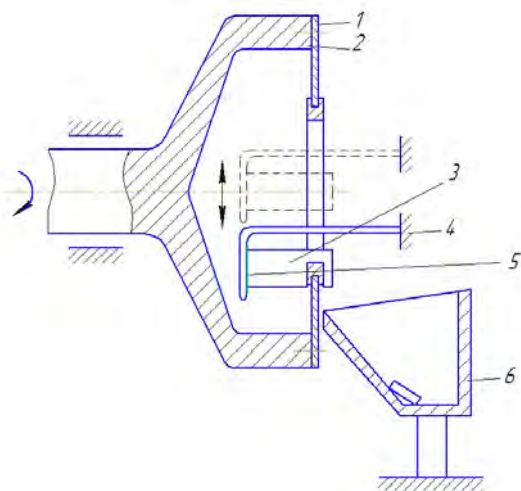


Рис. 1.4. Схема резки слитка кругом АКВР: 1 – круг; 2 – барабан; 3 – слиток; 4 – оправка; 5 – клеящая мастика; 6 – сборный лоток

Круг 1 растягивают и закрепляют на барабане 2, которому сообщают вращательное движение вокруг своей оси. Слиток 3 вводят во внутреннее отверстие круга АКВР на расстояние равное сумме заданной толщины пластины и ширины пропила. После этого производят прямолинейное перемещение слитка относительно вращающегося круга, в результате чего от слитка отрезается пластина. Последняя может падать в сборный лоток 6 или удерживаться после полного прорезания слитка на оправке 4 за счет клеящей мастики 5. После сквозного прорезания слитка, его отводят в исходное положение, и круг выходит из образовавшейся прорези. Затем слиток снова перемещают на заданный шаг во внутреннее отверстие круга и повторяют цикл распиливания пластины.

Обязательным условием качественного распиливания слитка на пластины является правильная установка и закрепление круга АКВР. Благодаря повышенной прочности материала круга и его способности к значительному вытягиванию, обеспечивается доста-

точно высокая его жесткость, что способствует повышению, в сравнении с распиливанием АОК, точности и качества поверхности пластин. Натяжение диска, т.е. его жесткость, непосредственно влияет на показатели процесса распиливания. Так недостаточное натяжение приводит к искажению формы отрезаемых пластин, их поломке, отклонению от плоскости ориентации пластин, а чрезмерное натяжение увеличивает износ диска.

На сегодня используются два способа натяжения круга на барабан: механический и гидравлический. Первый (рисунок 1.5) основан на том, что круг 2 сначала зажимают в кольцах 4 стягивающими винтами 1, после чего регулируемыми винтами 3 прикрепляют кольца к барабану 5. По мере затягивания регулирующих винтов круг растягивается на барабане. Затяжку винтов производят постепенно, чтобы перемещение колец относительно барабана было равномерным по всей окружности. Как правило, последовательно, один за другим затягивают диаметрально, а затем крест-накрест расположенные винты.

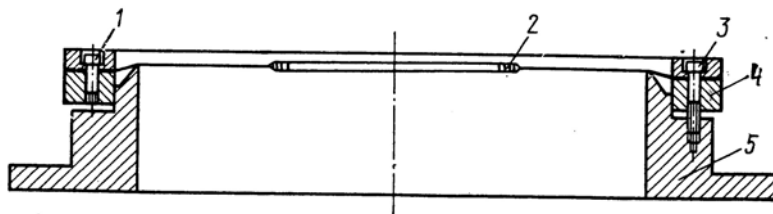


Рис. 1.5. Схема механического способа натяжения круга: 1 – стягивающие винты; 2 – круг; 3 – регулирующие винты; 4 – кольца; 5 – барабан

В силу того, что усилия натяжения прикладываются локально в местах завинчивания стягивающих и регулирующих винтов, установленный круг не является идеально плоским инструментом и приобретает ряд погрешностей геометрической формы. Неравномерность растягивающего усилия по корпусу достигает 50–100%. Натяжение кругов АКВР, особенно с увеличением их диаметра, регулируемыми винтами весьма трудоемко и требует высокой квалификации оператора.

Значительно проще и быстрее круг натягивается с помощью гидравлического механизма, обеспечивающего равномерное растяги-

вающее усилие по внешнему контуру круга. Принцип гидравлического натяжения поясняется схемой, приведенной на рисунке 1.6.

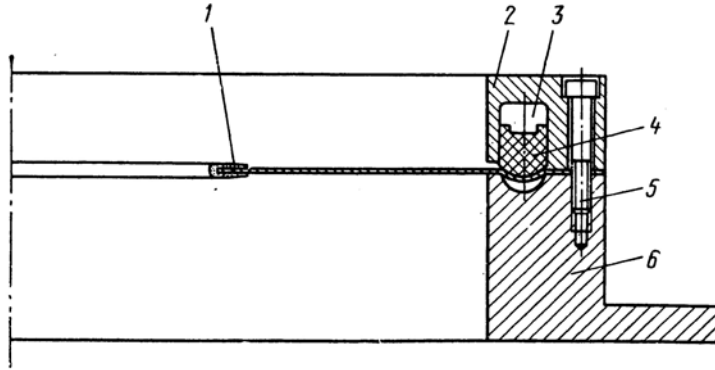


Рис. 1.6. Схема гидравлического способа натяжения круга: 1 – круг; 2 – зажимное кольцо; 3 – кольцевая полость; 4 – эластичная прокладка; 5 – винт; 6 – барабан

В посадочном кольце барабана 6 выполнена кольцевая канавка, напротив которой расположена эластичная прокладка 4, находящаяся в кольцевой полости 3 зажимного кольца 2. Кольцевая полость соединена с двумя резьбовыми отверстиями (на рисунке 1.6 они не показаны), которые предназначены для заполнения ее рабочей жидкостью. На установочные центрирующие штифты посадочного кольца устанавливают круг 1. Штифты выполнены с очень высокой точностью и в совокупности с точным исполнением посадочных отверстий в корпусе круга обеспечивают высокоточную центровку режущей кромки относительно оси вращения барабана.

Зажимное кольцо с находящейся в его полости эластичной прокладкой предварительно размещают на столе наклонно таким образом, чтобы выпускное отверстие располагалось выше впускного. Затем заглушку из выпускного отверстия выворачивают. Через ниппель впускного отверстия специальным шприцем в полость закачивают рабочую жидкость до тех пор, пока из выпускного отверстия не прекратится выход пузырьков воздуха, а будет вытекать чистая жидкость. После этого заглушку заворачивают в выпускное отверстие и устанавливают зажимное кольцо с эластичной прокладкой на штифты посадочного кольца. Скрепляя кольцо винтами 5, их затягивают до упора. Затем выворачивают заглушку на выпускном

отверстия на два-три оборота и закачивают жидкость до тех пор, пока не прекратится выход пузырьков воздуха. После этого заглушку заворачивают и закачивают в полость рабочую жидкость, как правило, глицерин. Под действием давления жидкости эластичная прокладка вдавливают круг в кольцевую канавку посадочного кольца. Вследствие того, что наружная кромка зажата винтами, растягивается его внутренняя часть, достигая необходимой жесткости.

Следует отметить, что при натяжении круга гидравлическим механизмом радиальное биение не регулируется и не может быть устранено без правки его режущей кромки. Правка, позволяющая уменьшить или устранить радиальное и осевое биение режущей кромки, заключается в разрезании алмазным кругом абразивного бруска из карбида кремния или электрокорунда с размером зерен 20–40 мкм. В процессе правки удаляется часть режущей кромки в наиболее выступающих частях. Абразивный брусок прорезают три-пять раз для придания режущей кромке оптимальной формы. Выполняется правка при частоте вращения круга 1500–2000 мин⁻¹, подаче порядка 20 мм/мин и расходе смазочно-охлаждающей жидкости 4–8 л/мин. Правку также проводят в процессе эксплуатации круга по мере потери кромкой режущих свойств.

Установлено, что для каждого типоразмера круга АКВР существует оптимальная жесткость корпуса, при которой обеспечивают высокие стойкость круга и качество поверхности пластин, а также минимальная ширина пропила. Известно несколько способов оценки и контроля жесткости круга, наиболее простым из которых является способ основанный на измерении диаметра его внутреннего отверстия. За счет растяжения материала корпуса круга при его установке диаметр внутреннего отверстия увеличивается на 0,5–1,0 % от исходного значения. Поэтому, измеряя увеличение диаметра внутреннего отверстия специальным индикатором и доводя его до заданного значения, добиваются требуемой жесткости круга. Также можно оценивать жесткость круга по величине его прогиба под действием сосредоточенной нагрузки.

Наиболее точную оценку жесткости круга обеспечивает способ, основанный на измерении собственной частоты колебаний натянутого корпуса. Изменение жесткости круга вызывает изменение собственной частоты его колебаний, что проявляется, например, при изменении высоты звука, возникающего при легком постукивании

по кругу. Измерение частоты собственных колебаний натянутого круга осуществляют с помощью специального прибора, состоящего из бесконтактного возбудителя колебаний (электродинамического вибратора), бесконтактного датчика и измерительного блока. Частота возбуждающих (вынужденных) колебаний задается генератором низкой частоты. По максимальному показанию индикатора устанавливается момент совпадения частоты генерируемых колебаний с резонансной частотой круга. Оптимальные частоты собственных колебаний кругов с корпусами толщиной 0,1 мм, изготовленных из стали марки 12Х18Н10Т, имеют следующие значения: круг АКВР 206 х 83 – 1100–1200 Гц; АКВР 305 х 100 – 800–850 Гц; АКВР 422 х 152 – 550–600 Гц.

Не менее важной характеристикой натянутого круга является радиальное биение режущей кромки. Необходимо, чтобы после натяжения все точки внутренней режущей кромки были равноудалены от центра круга, через который проходит ось его вращения. Превышение радиального биения больше допустимого приводит к ухудшению плоскостности отрезаемых пластин и возникновению на их поверхности трещин и сколов. Кроме того, при большом радиальном биении кромка работает не на всем своем протяжении, а лишь на небольших участках, что вызывает снижение стойкости круга.

Контроль радиального биения режущей кромки наиболее просто осуществляется с помощью индикатора часового типа. Для этого стойку индикатора закрепляют на столе станка, а измерительный наконечник индикатора подводят к внутренней поверхности режущей кромки неподвижного круга. После снятия показания индикатора измерительный наконечник отводят от режущей кромки и круг поворачивают вокруг его оси на некоторый угол, после чего выполняют следующее измерение. Произведя, таким образом, измерения на 8–10 равноудаленных друг от друга точках режущей кромки, вычитают из наибольшего показания индикатора наименьшее, получая в результате значение радиального биения.

Современные станки резки оснащаются специальными датчиками радиального биения режущей кромки диска, с помощью которых осуществляется контроль этого параметра как в процессе натяжения круга, так и непосредственно в процессе резки.

Основными параметрами режима резания, определяющими производительность обработки, качество отрезаемых пластин и стой-

кость инструмента, являются скорость резания, рабочая подача и расход смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Скорость резания в основном определяется прочностью обрабатываемого материала и его склонностью к налипанию на режущую кромку. Основным фактором, ограничивающим повышение скорости резания, является увеличение температуры в зоне обработки, которое зависит от прочности материала и состояния режущей поверхности круга. Помимо этого, повышение частоты вращения круга с внутренней режущей кромкой препятствует попаданию достаточного количества СОЖ в зону резания, так как приводит к росту центробежной силы.

Рабочая подача определяет производительность резки, поэтому ее значение стремятся поддерживать на возможно высоком уровне. Однако существует ряд причин, ограничивающих ее значение. В частности, увеличение подачи приводит к ухудшению геометрических параметров пластин и росту нарушенного слоя на их поверхности. Также с увеличением подачи происходит ускоренный износ инструмента в силу возрастания сил резания. Кроме того, при большой подаче не представляется возможным отрезать тонкие пластины из-за повышения уровня вибраций круга, вызывающего их сколы.

Чаще всего сколы происходят во время врезания круга АКВР в слиток и во время окончания реза. Объясняется это повышенными вибрациями круга, которые в недостаточной степени ограничиваются стенками прорезаемой в слитке канавки. Помимо этого, при малой длине контакта режущей кромки и слитка на каждое алмазное зерно приходится большая нагрузка, которая может скалывать пластину или же инициировать образование большой глубины нарушенного слоя в зонах врезания круга и его выхода из слитка.

Чтобы предотвратить сколы пластин и выровнять глубину нарушенного слоя по всей поверхности пластины, осуществляют регулирование подачи в процессе отрезания каждой пластины, как показано на рисунке 1.7 [5].

С увеличением диаметров слитков полупроводниковых материалов до 150–200 мм возникли трудности при их разделении на пластины. Связано это с увеличением дуги контакта инструмента и слитка, что ухудшает условия транспортирования СОЖ в зону резания. Кроме того, увеличение размеров кругов АКВР неизбежно влечет за собой повышение толщины корпуса и режущей кромки,

что, в свою очередь, приводит к возрастанию потерь полупроводников на пропил. При этом сложно обеспечить высокие геометрические параметры пластин большого диаметра.

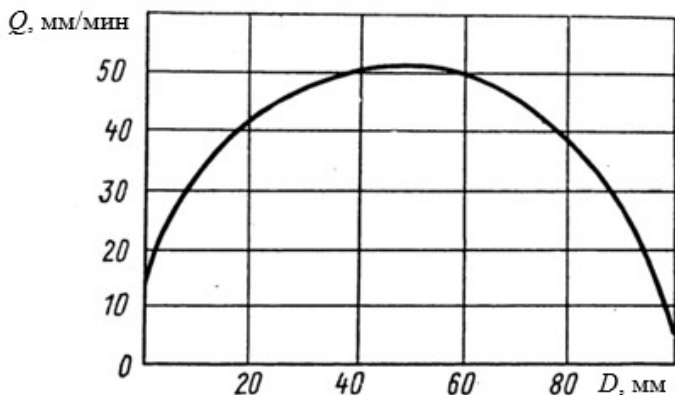


Рис. 1.7. Рекомендуемый график изменения величины подачи Q в процессе отрезания пластин кремния диаметром $D = 100$ мм с помощью алмазного отрезного круга с внутренней режущей кромкой ($v_{кр} = 20$ м/с)

Для решения возникших проблем была предложена схема резки кругом АКВР с одновременным вращением круга 1 и слитка 2 (рис. 1.8).

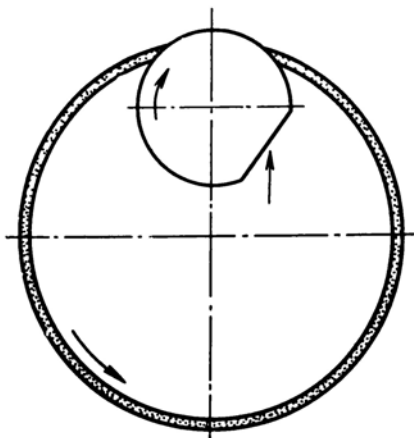


Рис. 1.8. Схема резки с вращением слитка

Такая схема позволяет использовать круги АКВР меньших размеров. Однако в этом случае по мере разрезания вращающегося вокруг своей оси слитка между пластиной и слитком остается соединяющая их цилиндрическая «шейка» диаметром 2–3 мм. Пластины отделяют от слитка скалыванием «шейки», в результате чего в центре пластины с обеих сторон остаются выступы, препятствующие ее дальнейшей механической обработке. С целью исключения этого недостатка вдоль оси слитка предварительно с помощью трубчатого алмазного сверла получают сквозное отверстие, в которое устанавливают жесткую оправку, прорезая затем слиток до ее поверхности. Несмотря на некоторые технологические трудности, связанные с реализацией данного способа распиливания, он широко используется при резке особо твердых материалов, например, таких как сапфир, поликор, рубин и др. Рекомендуемые режимы резания кругами АКВР наиболее распространенных материалов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Рекомендуемые режимы резки некоторых материалов алмазными кругами с внутренней режущей кромкой

Обрабатываемый материал (кристаллографические направления)	Скорость резания, м/с	Рабочая подача, мм/мин	Расход смазочно-охлаждающей жидкости, л/мин	
			На охлаждение	На очистку кромки
Кремний (111)	17–19	40–70	6–8	6–8
Кремний (100)	17–19	30–60	6–8	6–8
Германий (111)	18–20	40–70	4–6	4–6
Германий (100)	18–20	30–60	4–6	4–6
Арсенид галлия	15–17	15–20	3–5	3–5
Фосфид галлия	15–17	10–15	3–5	3–5
Арсенид индия	11–12	15–20	3–5	3–5
Сапфир (с вращением слитка)	6–8	1–3	10–15	10–15

Обрабатываемый материал (кристаллографические направления)	Скорость резания, м/с	Рабочая подача, мм/мин	Расход смазочно- охлаждающей жидкости, л/мин	
			На охла- ждение	На очистку кромки
Гранат	14–16	6–8	10–12	10–12
Кварц	11–12	10–20	10–12	10–12
Ниобат лития	18–20	30–40	4–5	2–3
Самариевый кобальт	14–16	8–10	6–8	6–8
Феррит	16–18	15–20	2–3	2–3

Довольно широкие пределы значений режимов резки объясняются большим разбросом диаметров применяемых в промышленности слитков.

В процессе обработки разрезаемый слиток закрепляют на специальной оправке, при этом способ крепления зависит от того, как извлекают из зоны обработки отрезанные пластины. В том случае, когда пластина после отрезания от слитка падает в заполненный водой сборник, то слиток крепят только одним торцом к оправке. Однако такой способ приводит к бою большого количества пластин, так как довольно легкая пластина может прилипнуть к смоченному корпусу круга и разбиться при его быстром вращении. Чтобы исключить прилипание отрезаемой пластины, ее поддерживают вакуумной присоской, которая фиксирует ее в процессе отрезания и переносит в сборный лоток или на ленту транспортера. При этом включение и перемещение вакуумной присоски осуществляются автоматически. Отрезанные пластины могут удерживаться на оправке клеящей мастикой (шеллак или эпоксидная смола), нанесенной на образующую слитка. Достаточно толстый и широкий слой мастики позволяет удерживать отрезанные пластины без оправки (рисунок 1.9)

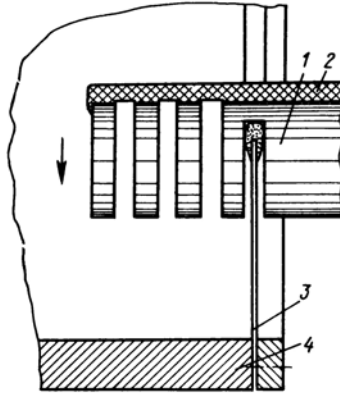


Рис. 1.9. Фиксация отрезанных пластин с помощью мастики:
1 – слиток, 2 – слой мастики, 3 – круг АКВР, 4 – барабан

В зависимости от направления поперечной подачи различают три варианта резки, схемы которых приведены на рисунке 1.10.

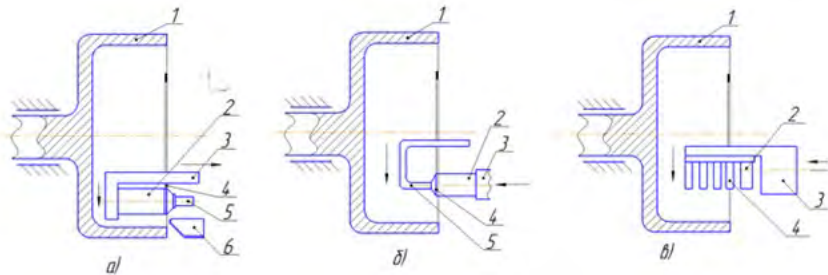


Рис. 1.10. Схемы резки слитков: а – наружная; б – внутренняя; в – гребенчатая;
1 – барабан; 2 – слиток; 3 – оправка; 4 – отрезные пластины; 5 – пневматический
съемник; 6 – сборник

При наружной резке, или резке из барабана (рисунок 1.10а), слиток 2 приклеивают к оправке 3 торцевой частью, заводя внутрь барабана 1, и при резке подают из него на требуемый шаг резки. Отрезанные пластины 4 падают в сборник 6 или их удаляют из зоны резания пневматическим съемником 5. Достоинствами этого варианта является простота удаления отрезанных пластин и удобство наблю-

дения за процессом резки, а недостатком – сравнительно небольшая длина разрезаемого слитка, ограничиваемая глубиной барабана.

При внутренней резке, или резке в барабан (рисунок 1.10б), слиток также крепят торцевой частью, а пластины отрезают при движении слитка внутрь барабана. Отрезаемые пластины удаляются из зоны резания пневматическим съемником или другим устройством. Достоинством этого варианта является возможность резки слитка большой длины, а недостатком – сложность удаления отрезанных заготовок и затрудненность контроля за протеканием процесса.

Общим недостатком рассмотренных вариантов является образование заусенцев на краю пластин при их отламывании от слитка в конце резки, для удаления которых требуется дополнительная операция. От этого недостатка свободна гребенчатая резка (рисунок 1.10в), при которой слиток приклеивают к оправке цилиндрической поверхностью, а пластины удерживаются мастикой до окончания резки и не имеют заусенцев. К недостаткам этого варианта распиливания следует отнести сложность наклейки, в силу того, что слитки не всегда имеют правильную цилиндрическую форму, а также ограниченная по сравнению с внутренним вариантом длина разрезаемого слитка, так как пластины не удаляются в процессе резки, а снимаются вручную после разрезки всего слитка. Обычно наружный и гребенчатый варианты применяются при резке слитков, соответственно, диаметром до 40 мм и свыше 40 мм, так как с увеличением диаметра пластин труднее обеспечить их высокую геометрическую точность.

Распиливание (резку) монокристаллов полупроводниковых материалов кругами АКВР производят на высокоточных полуавтоматических станках. По расположению и способу подачи круга на слиток все модели станков можно разделить на три типа:

- с горизонтально расположенным шпинделем;
- с вертикально расположенным шпинделем;
- с горизонтально расположенным качающимся шпинделем.

В станках с вертикально расположенным шпинделем его вал выполняют полым для свободного прохождения слитка. Однако большой диаметр вала требует применения прецизионных подшипников большого диаметра, которые быстро изнашиваются. Поэтому предпочтение отдают станкам с горизонтально расположенным шпинделем.

Более совершенными моделями станков резки являются полуавтоматы «Алмаз-11» и «Алмаз-12М», которые оснащены датчиками контроля состояния инструмента и качества пластин.

Способ распиливания кристаллов АКВР обеспечивает отклонение от плоскостности и параллельности поверхностей реза от 5 до 10 мкм. В целом данному способу распиливания присущи следующие недостатки:

- невозможность резки слитка на пластины толщиной менее 200 мкм из-за образования значительной (20–30 мкм) нарушенного слоя, удаление которого возможно только при дальнейших технологических операциях (шлифовки или химического травления), что ограничивает применение данного способа резки в технологии получения тонких резанных пластин, к примеру, в технологии изготовления кремниевых солнечных элементов;

- ограниченный размер обрабатываемого слитка, диаметр которого не должен превышать 200 мм.

1.3. Способ распиливания алмазной бесконечной ленточной пилой

Этот способ распиливания, схема которого приведена на рисунке 1.11, используется для разделения на пластины слитков диаметром более 100 мм и крупных блоков на заготовки из кварца, ниобата лития, оптического стекла, сапфира и др. [5, 6]. В качестве инструмента используется ленточная пила 1, к которой предъявляются высокие требования по прочности и режущей способности. Так, корпус толщиной 0,1–0,25 мм выполняют из материала, обладающего прочностью на разрыв не менее 1500 МПа. В виду того, что лента многократно огибается при обкатывании вокруг направляющих валков 2, она должна обладать высокой циклической прочностью к сложному нагружению, складывающемуся из растяжения, изгиба и контактного давления. После установки ленты валки раздвигают, создавая в ней растягивающее напряжение порядка 100 – 200 МПа. При ширине ленты 20–100 мм, этому соответствует усилие, раздвигающее валки в пределах 16–400 Н.

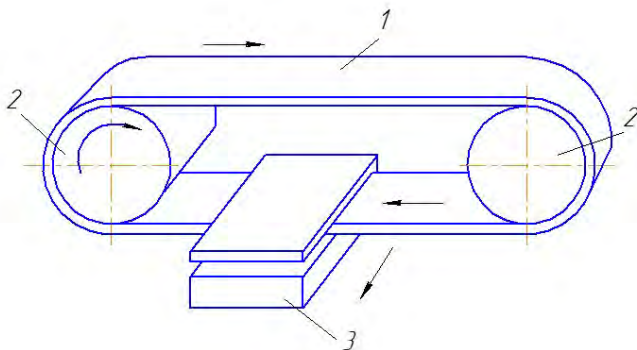


Рис. 1.11. Технологическая схема распиливания алмазной бесконечной ленточной пилой: 1 – ленточная пила; 2 – направляющие валки; 3 – заготовка

Режущую кромку ленточной пилы изготавливают по всей протяженности ленты либо в виде отдельных сегментов. При этом сплошная кромка не обладает достаточной циклической стойкостью на изгиб из-за хрупкости металлической связи. При длительной эксплуатации пилы на режущей кромке появляются трещины и алмазосодержащий слой отслаивается от корпуса. Прерывистая кромка в виде сегментов оказывается более стойкой к изгибающим нагрузкам.

При изготовлении режущей кромки особое внимание уделяется тому, чтобы толщина алмазосодержащих слоев на обеих сторонах была одинаковой. При разнотолщинности слоев (несимметричности кромок) ухудшаются геометрические параметры отрезаемых пластин. Зернистость алмазного порошка, используемого для изготовления ленточных пил, зависит от обрабатываемого материала и выбирается в пределах 50/40–125/100.

Скорость резания ленточной пилой при распиливании полупроводниковых и других материалов, используемых в электронной технике составляет 15–25 м/с. Подача зависит от характеристик распиливаемого материала и сходна с подачей при резке этого материала кругами АКВР. Зону обработки охлаждают водными растворами поверхностно-активных веществ. При этом важно, чтобы продукты резания удалялись с инструмента жидкостью, так как при их попадании между ленточным корпусом и валками происходит

абразивный износ инструмента и направляющих, вызывающий сначала ухудшение точности обработки, а затем – выход инструмента из строя.

Качественная установка ленточных пил на технически исправном оборудовании при правильно выбранных режимах обработки позволяет при распиливании слитков диаметром 100 и 200 мм на пластины обеспечить непараллельность сторон не более 5 и 15 мкм соответственно, при этом шероховатость обработанных поверхностей Ra не превышает 1 мкм.

Данный способ распиливания имеет следующие недостатки:

- высокая стоимость инструмента, вызванная применением в качестве абразивного материала искусственных или природных алмазов;
- невысокая технологичность способа, обусловленная необходимостью выведения из зоны резания каждой отрезанной пластины.

1.4. Способ абразивного распиливания полотнами (штрипсами)

В настоящее время этот способ используют для распиливания на пластины монокристаллов некоторых полупроводниковых соединений, заготовок оптического стекла, кварца, феррита, ниобата лития [7]. Схема распиливания штрипсами слитка на пластины представлена на рисунке 1.12.

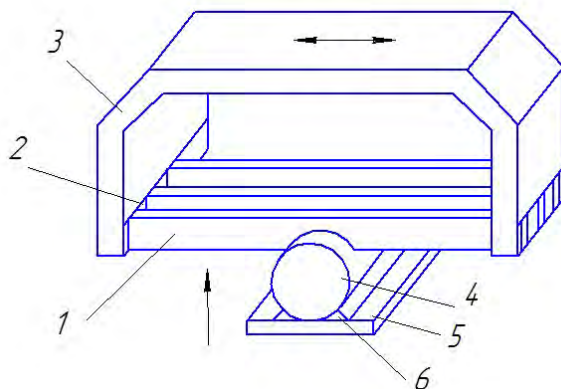


Рис. 1.12. Технологическая схема распиливания слитка на пластины штрипсами:
1 – стальные полотна; 2 – разделительные прокладки; 3 – рама;
4 – обрабатываемый слиток; 5 – подложка; 6 – мастика клеящая

Стальные полотна 1, чередуя с разделительными прокладками 2, собирают в пакет, который закрепляют на раме 3. Обрабатываемый слиток 4, приклеенный к подложке 5 с заданным усилием прижимают к полотнам. Рама с полотнами совершает возвратно-поступательное движение с амплитудой, равной свободной длине полотен с вычетом диаметра слитка. На слиток подают абразивную суспензию, которая попадает между ним и полотнами, выкалывая микрочастицы обрабатываемого материала и постепенно формируя прорезь.

В пакет стараются набрать как можно больше полотен, так как пропорционально увеличению их числа возрастает производительность обработки. Однако на практике больше 150–250 полотен не набирают. Это ограничение объясняется тем, что очень сложно с достаточным усилием и его равномерностью натянуть большое число полотен. При этом слабо натянутые полотна колеблются в процессе распиливания, увеличивая тем самым ширину пропила, а перетянутые – быстрее выходят из строя. Из-за образования пропилов разной ширины отрезанные пластины значительно отличаются по их толщине. Преждевременный выход из строя одного из полотен вызывает необходимость разборки, сборки и регулировки инструмента, что является трудоемкой процедурой. Кроме того, при повторной установке набора полотен в образовавшиеся прорези не удастся обеспечить их идеального совмещения, в результате чего на сторонах отрезанных пластин образуются ступеньки.

Следует отметить, что полотна довольно быстро изнашиваются, несмотря на то, что их изготавливают из высокопрочной термообработанной пружинной стали. Стойкость полотен зависит от твердости обрабатываемого материала, а также твердости и зернистости абразива. При распиливании сравнительно мягких полупроводниковых материалов стойкость полотен достигает 25–40 часов, а при обработке кварца и ниобата лития – 10–15 часов. При изнашивании полотен уменьшается их толщина, причем в средней части полотна становятся тоньше, чем по краям. Уменьшение толщины полотен в процессе распиливания вызывает дополнительные погрешности формы пластин.

В процессе распиливания абразив подают в зону взаимодействия полотен со слитком в виде пасты или суспензии. Свободные зерна абразива, попадая на кромку штрипсов, прижимаются к распилива-

емой поверхности материала и перекатываются по нему, вызывая образование микротрещин, переходящих в макротрещины, глубина которых зависит от природы и размеров зерен абразива. Дальнейшее перекатывание зерен приводит к выкалыванию частиц определенных размеров, определяющих шероховатость распиленной поверхности.

Пасту используют в случае применения в качестве абразива алмазного порошка. Суспензию готовят перемешивая абразивный порошок с водой. Содержание порошка в ней может колебаться от 20 до 30%. Меньшее содержание порошка делает суспензию слишком жидкой, в результате чего она быстро вытекает из зоны обработки, участвуя в резании непродолжительное время. Увеличение содержания порошка сверх рекомендуемых пределов делает суспензию густой, вследствие чего забивается образовавшаяся прорезь, повышается температура в зоне обработки и ухудшается качество поверхности пластин. В ряде случаев для повышения качества обработки и производительности распиливания в суспензию добавляют глицерин. Кроме алмазного порошка для приготовления суспензии используют порошки карбида кремния, карбида бора и электрокорунда зернистостью 10/7–60/50 мкм.

В камнеобработке, в частности, при распиливании блоков природного и поделочного камня, а также других неметаллических материалов используются штрипсы, армированные алмазными элементами [8]. В этом случае штрипсовая пила состоит из алмазного U – образного элемента, припоя или клеящей пленки (для сверхтонких штрипсовых пил) и корпуса. Последовательность изготовления такого инструмента включает в себя следующие операции. Предварительно прокатывается деформируемый алмазный прокат, форма поперечного сечения которого показана на рисунке 1.13а. Затем, после отжига, прокат изгибается для придания ему U – образной формы (рисунок 1.13б). Высота h элемента составляет порядка 5 мм, а его ширина b на 2–3 мм больше толщины δ корпуса штрипсы. Эти 2–3 мм складываются из зазора $\Delta = 0,1–0,2$ мм и толщины проката по загибаемым краям h_2 , т.е. $b = \delta + \Delta + 2h_2$. После этого прокат разделяется на отдельные элементы нужной длины. Затем элемент 1 (рисунок 1.13в) вставляют в корпус штрипсовой пилы 2 с заполнением зазора между ними серебряным припоем 3 (ПСр-40 с флюсом) или вставкой в зазор клеящей пленки.

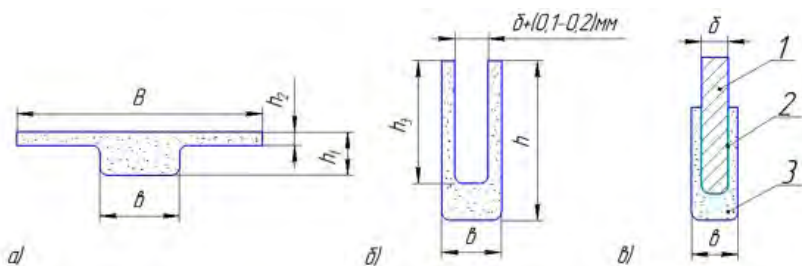


Рис. 1.13. Основные стадии изготовления штрипсы, армированной алмазными элементами. а – форма поперечного сечения деформируемого алмазного проката; б – U – образная форма алмазного проката после его гибки; в – соединение алмазного элемента с корпусом штрипсы; 1 – элемент; 2 – штрипсовая пила; 3 – серебряный припой

Элемент прижимается к корпусу с одновременным нагревом до прихватки его к нему с получением таким образом прочного их соединения, достаточного для распиливания камня.

В процессе распиливания штрипсами рама с закрепленными в ней полотнами совершает возвратно-поступательные перемещения, частота которых зависит от длины полотен и массы движущихся частей. Длина рабочей части полотен колеблется в широких пределах, и обычно ее выбирают несколько больше, чем удвоенный диаметр разрезаемого слитка. При соблюдении этого условия продукты обработки хорошо удаляются из пространства пропила. При длине полотен 800 мм рама совершает не более 50 дв.ход/мин, а с уменьшением длины полотен она повышается до 300–500 дв.ход/мин. Линейная скорость перемещения полотен не превышает 0,8–1,2 м/с, повышение которой ограничивается инерционностью рамы. Столь низкая скорость резания обуславливает невысокую производительность обработки одним полотном, к примеру при распиливании слитков арсенида галлия или германия за один час можно распилить слиток, площадь поперечного сечения которого составляет 200–250 мм². Вместе с тем при обработке очень хрупких полупроводниковых соединений низкая скорость резания становится положительным качеством. Снижение скорости обработки и использованием более мягких, чем алмаз, абразивных материалов позволяют уменьшить глубину нарушенного слоя на сторонах отрезанных пластин и уменьшить их бой. Штрипсовые пилы широко используются

при распиливании дорогостоящих материалов (кварц, лейкосапфир и др.), так как позволяют резать материалы больших площадей при минимальных потерях на пропил.

К недостаткам рассматриваемого способа распиливания следует отнести следующее. Переменное колебательное движение рамы с закрепленными инструментами является источником значительных вибрационных процессов в системе СПИД, особенно в случае резки слитков больших размеров при большом количестве лезвий. Ограничивает использование данного метода и то, что очень сложно обеспечить постоянное усилие натяжения всех лезвий. Кроме того, преждевременная потеря одного из лезвий ведет к снижению производительности и уменьшению выхода годных пластин. Качество резки может существенно снижаться из-за ослабления натяжения отдельных лезвий, стойкость которых при резке полупроводниковых материалов сравнительно невысокая и составляет 40–60 часов.

1.5. Способ абразивного распиливания проволокой

Технологическая схема данного способа распиливания представлена на рисунке 1.14 [5, 6].

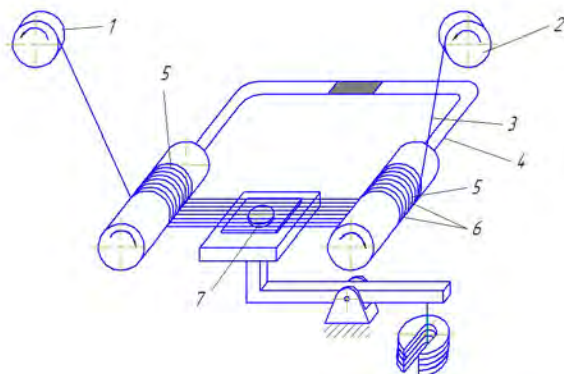


Рис. 1.14. Технологическая схема распиливания слитка на пластины проволокой:

- 1 – приемная катушка; 2 – подающая катушка; 3 – вольфрамовая проволока;
- 4 – кассета; 5 – вращающиеся ролики; 6 – канавки; 7 – распиливаемый слиток

Инструментом служит прочная стальная или вольфрамовая проволока 3 диаметром 0,08–0,1 мм, которая перематывается с подаю-

шей катушки 2 на приемную катушку 1, проходя последовательно сверху и снизу через вращающиеся ролики 5. Расстояние между витками проволоки (шаг резки) обеспечивается канавками 6, проточенными на роликах. Количество рядов проволоки может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен. Ролики закреплены на кассете 4. Для обеспечения требуемого натяжения проволоки подающую катушку соответствующим образом подтормаживают. Распиливаемый слиток 7 прижимается статическим усилием к движущимся проволокам, а в зону обработки подается абразивная суспензия. Учитывая сравнительно низкие прочность и жесткость проволоки, усилие, прикладываемое к ней со стороны слитка невелико, что определяет малую производительность. В основе процесса распиливания лежит, как и в предыдущем способе, механизм хрупкого разрушения материала свободным абразивом с образованием в нем трещин.

Распиливание проволокой с применением абразива имеет две разновидности. В одном случае проволока наматывается на ролики, закрепленные на специальной вилке, которой от кривошипно-шатунного механизма сообщается возвратно-поступательное движение. При этом проволока, совершая возвратно-поступательное движение с вилкой, медленно перематывается, чем обеспечивается ее равномерный износ по всей рабочей длине. В другом случае резка происходит по принципу перемотки проволоки с одного ролика на другой с большой скоростью. Ширина реза определяется диаметром проволоки и превышает его на удвоенную максимальную зернистость абразива.

При многопроволочной резке в качестве инструмента также может использоваться тонкая диаметром 0,2–0,3 мм стальная проволока, на поверхности которой методом гальваностегии сформировано режущее алмазосодержащее покрытие. По сравнению с распиливанием с использованием свободного абразива применение проволоки с алмазосодержащим покрытием позволяет существенно повысить производительность выполнения операции, но при этом снижается качество поверхности реза монокристаллов полупроводниковых материалов и увеличивается глубина дефектного слоя на ней, что является существенным недостатком [9].

Кроме того опыт применения высокоскоростной многорядной резки монокристаллов кремния, сапфира и т.п. с использованием

проволоки с алмазосодержащим покрытием выявил недостатки данного инструмента: низкая стойкость алмазированной проволоки к продольным изгибам и скручивающим силам, приводящим к ее поломке; невысокий ресурс работы алмазного слоя из-за расшатывания алмазных зерен в толстой хрупкой связке, выкрашивание частиц последней в опорной зоне зерен и выпадение их из связки до исчерпания ресурсных возможностей.

С целью устранения этих недостатков авторами [10] предложено формировать на поверхности проволоки многослойное покрытие (рисунок 1.15).

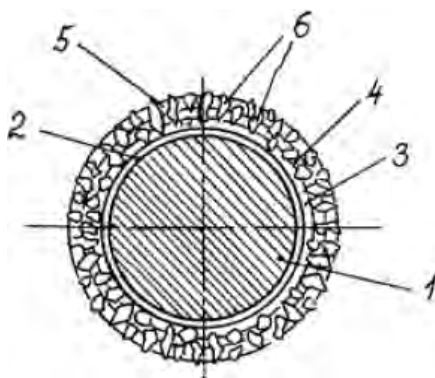


Рис. 1.15. Поперечное сечение проволоки с многослойным покрытием:
1 – стальная проволока; 2 – слой меди; 3 – слой никеля; 4 – алмазные зерна;
5 – нигелевый слой; 6 – слой меди

Основой инструмента является высокопрочная стальная проволока 1. Снаружи она покрыта слоем 2 меди, что обеспечивает хорошую адгезию со сталью основы осаждаемых гальванически последующих слоев никеля 3, меди 6, и наружного (внешнего) слоя нигелевого 5. Гальваническое осаждение указанных металлических слоев осуществляется с внедрением в них алмазных (абразивных) зерен 4 размером от 20 до 200 мкм по технологии заравнивания алмазных зерен металлом.

Наличие мягкой медной связи между твердыми слоями никелевой связки обеспечивает струне оптимальную эластичность при продольных изгибах проволоки на катушках и роликах станков

проволочной резки, а также при скручивающих проволоку нагрузках. При этом слои твердого металла надежно удерживают алмазные зерна, а медные прослойки препятствуют (амортизируют) распространению трещин из фронтальной (работающей в данный момент) поверхности вглубь абразивной оболочки проволоки, предотвращая тем самым выкрашивание частиц твердого металла связки и абразивных зерен.

Рассмотренный способ позволяет изготовить алмазно-абразивную проволоку поверхность которой полностью оснащена режущим слоем. Однако этот способ не позволяет изготовить проволоку с режущим слоем в виде дискретных элементов, протяженных параллельно оси основы вдоль ее длины, разделенных непокрытыми участками основы. Как известно, такая конструкция алмазно-абразивной проволоки способствует эффективному охлаждению зоны резания при разделении заготовок большого поперечного сечения и облегчению эвакуации продуктов резания из пропила.

В работе [11] предложен способ изготовления алмазно-абразивной проволоки с нанесением на ее основу режущего слоя на гальванической связке, выполненного в виде кольцеобразных дискретных или спиралеобразных элементов, разделенных непокрытыми участками основы. В этом случае изолирование от электролита части основы осуществляют путем прикрепления к ней неэлектропроводящего материала в виде последовательно расположенных дискретных кольцеобразных элементов (рисунок 1.16) или спирали (рисунок 1.17), соосных с основой. После гальванического нанесения на неизолированные части основы алмазно-абразивного режущего слоя изолирующий неэлектропроводный материал удаляют.

На рисунке 1.16а изображена электропроводящая основа 1, на которой прикреплены кольцеобразные дискретные элементы 2 из неэлектропроводящего материала. На рисунке 1.16б изображена электропроводящая основа (показана пунктиром), на которой расположены чередующиеся дискретные элементы из неэлектропроводящего материала 2 и гальванического алмазно-абразивного режущего слоя 3. На рисунке 1.16в изображена электропроводящая основа 1, на которой прикреплены кольцеобразные дискретные элементы 3 из гальванического алмазно-абразивного режущего слоя.

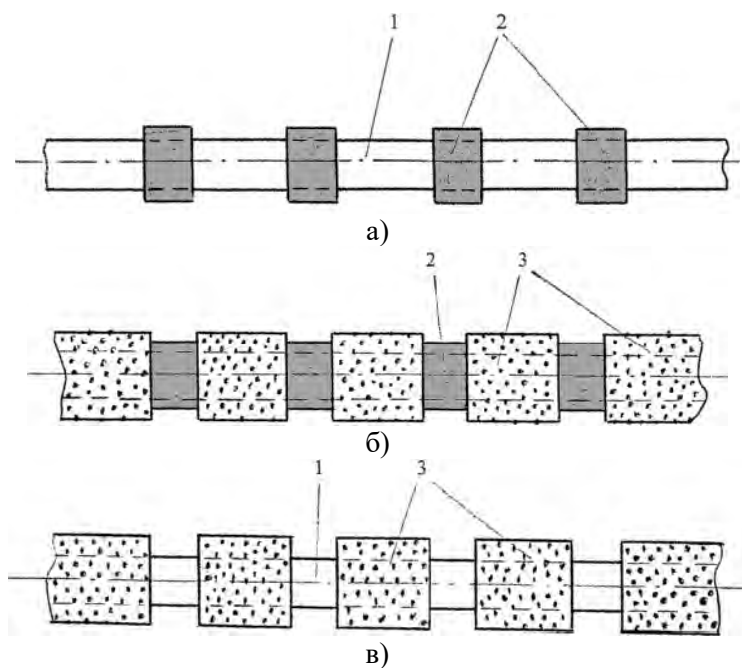


Рис. 1.16. Этапы получения дискретных цилиндрических режущих элементов на проволоке: 1 – основа; 2 – дискретные элементы; 3 – режущий слой

На рисунке 1.17 схематично показаны этапы формирования на поверхности проволоки спиралеобразного гальванического алмазно-абразивного режущего слоя.

На рисунке 1.17а изображена электропроводящая основа 1, на которой прикреплен неэлектропроводящий материал в виде спиралеобразной полимерной нити 2. На рисунке 1.17б изображена электропроводящая основа (показано пунктиром), на которой прикреплена спиралеобразная полимерная нить 2 из неэлектропроводящего материала и спиралеобразный гальванический алмазно-абразивный режущий слой 3. На рисунке 1.17в изображена электропроводящая основа 1, на которой прикреплен спиралеобразный гальванический алмазно-абразивный режущий слой 3.

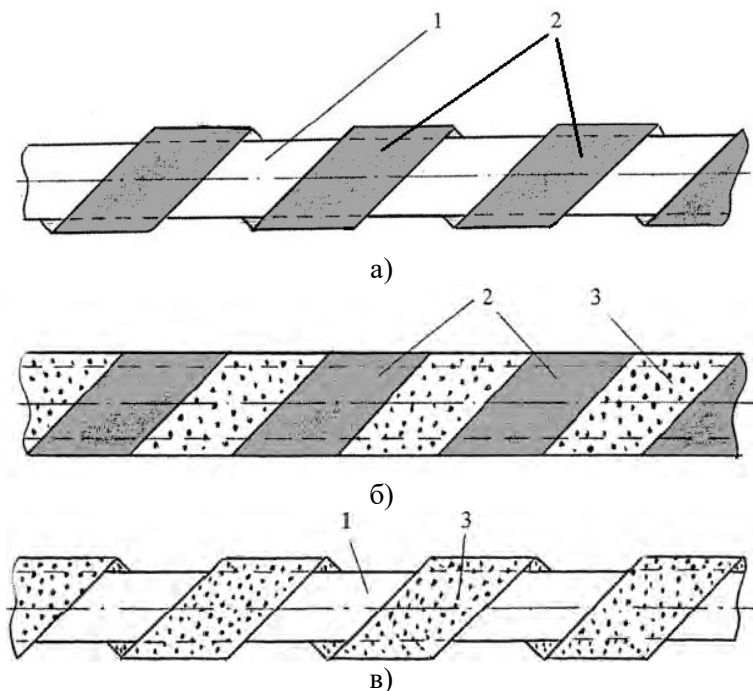


Рис. 1.17. Этапы получения спиралеобразных режущих элементов на проволоке:
 1 – электропроводящая основа; 2 – полимерная нить из неэлектропроводящего материала; 3 – алмазно-абразивный режущий слой

В качестве токопроводящей основы использовалась стальная проволока диаметром 0,3 мм. Проволока после очистки и обезжиривания перематывалась с одного барабана на другой. Перематывание осуществлялось дискретными шагами длиной 12 мм. Одновременно проволока приводилась во вращение вокруг своей оси. После остановки линейного перемещения на основу велюровым валиком шириной 4 мм наносился кольцеобразный слой химически стойкого лака марки «Элакор-ПУ». После этого участки нанесенного лака подвергались ускоренной сушке внешними источниками инфракрасного излучения. Затем методом гальванического осаждения никелевой связки и заравнивания алмазного синтетического порошка марки АС32 40/28 на проволоке с нанесенными дискретными участками лака формировался режущий слой. Последний осаждался

только на непокрытых лаком участках основы, формируя кольцеобразные дискретные элементы режущей кромки длиной 8 мм с внешним диаметром 0,4 мм. После этого с помощью уайке-спирта лак удалялся с поверхности проволоки.

Эксплуатационные испытания проволоки проводились путем разделения цилиндрического монокристалла сапфира диаметром 60 мм на пластины толщиной 2 мм на стандартном оборудовании при стандартных технологических режимах. Одновременно отрезалось 50 пластин. Износостойкость проволоки определялась как суммарная площадь пропила, отнесенная к эксплуатируемой длине до полного ее износа или обрыва. Площадь пропила измерялась в квадратных сантиметрах, а длина инструмента – в метрах. Измеренная таким образом износостойкость проволоки составила 24,8 см²/м, что на 40–50 % выше износостойкости проволоки со сплошной режущей кромкой.

Для формирования на стальной проволоке диаметром 0,5 мм спиралеобразной режущей кромки в процессе ее перематывания с катушки на катушку, скорость ее линейного перемещения и вращения вокруг своей оси подбирались таким образом, чтобы за один оборот проволока перемещалась на 6 мм. В соприкосновение с проволокой приводилась лента, выполненная из винипласта, шириной 2 мм и толщиной 0,2 мм. Зона контакта ленты с основой нагревалась источником инфракрасного излучения до температуры размягчения винипласта. После этого на проволоке со спиральным покрытием из винипласта методом гальванического осаждения никелевой связи и заращивания алмазного синтетического порошка марки АС6 28/20 формировался режущий слой. Затем винипластовое покрытие удалялось с помощью диметилформамида.

Эксплуатационные испытания проволоки проводились путем разделения цилиндрического монокристалла кремния диаметром 150 мм на пластины толщиной 1,2 мм и одновременно отрезалось 20 пластин. Измеренная, как и в предыдущем случае износостойкость проволоки составила 192 см²/м, что на 20–25 % выше износостойкости проволоки со сплошной режущей кромкой.

Однако применение указанного инструмента для обработки материалов с твердостью более 8 единиц по шкале Мооса является малоэффективным, так как при резке в работе находится большое количество алмазов, а для их эффективной работы требуется созда-

вать большие давления, что достигается увеличением натяжения проволоки. В этом случае, для предотвращения обрыва, следует увеличивать ее диаметр, что ведет к увеличению ширины пропила, а соответственно, к снижению процента выхода годного. К тому же указанный инструмент имеет высокую стоимость из-за сложности изготовления дискретного цилиндрического или спирального слоя алмазного покрытия, что ограничивает его широкое промышленное применение.

С целью повышения эффективности и уменьшения стоимости процесса распиливания хрупких неметаллических материалов повышенной твердости (более 8 единиц по шкале Мооса) авторами [12] предложено следующее техническое решение.

В этом случае (рисунок 1.18) абразивная проволока 1 содержит длинномерную (протяженную) металлическую основу 2 и режущий алмазный слой в виде зерен рабочих алмазов 3, распределенных в прикрепленном к основе периферийном слое 4. Металлическая несущая основа выполнена волнообразной с амплитудой A волны, превышающей размер фракции алмазов.

Металлическую несущую основу выполняют из высокопрочной стальной проволоки твердостью 3400–4000 Н/мм², периферийный слой получают с использованием гальванической связки на основе никеля. Размер фракции рабочих алмазов выбирают в зависимости от разрезаемого материала и требований к резке.

Процесс резки материала с использованием данной алмазной проволоки заключается в следующем. Алмазную проволоку перемещают в продольном направлении со скоростью 1–3 м/с и на нее подают охлаждающую жидкость. Рабочие алмазы 6, размещенные на поверхности в зоне перегиба 7, царапают разрезаемую заготовку 5 в зоне их контактирования. Шлам от прорезаемого материала скапливается в полости между разрезаемой заготовкой и изгибами проволоки и выносится при перемещении проволоки.

При износе рабочих алмазов 6 и периферийного слоя 4 алмазной проволоки, проволока опускаясь, немного растягивается. При этом постепенно, по мере износа алмазов 6 в зоне перегиба 7, в работу включаются соседние рабочие алмазы 8, что создает эффект «самозаточки» проволоки и обеспечивает возможность в процессе эксплуатации инструмента использовать подавляющее большинство

рабочих алмазов. Достигается это за счет того, что размер рабочих алмазов выполнен в диапазоне размеров одной фракции, а амплитуда А волны волнообразной проволоки выполнена больше номинального размера фракции зерна.

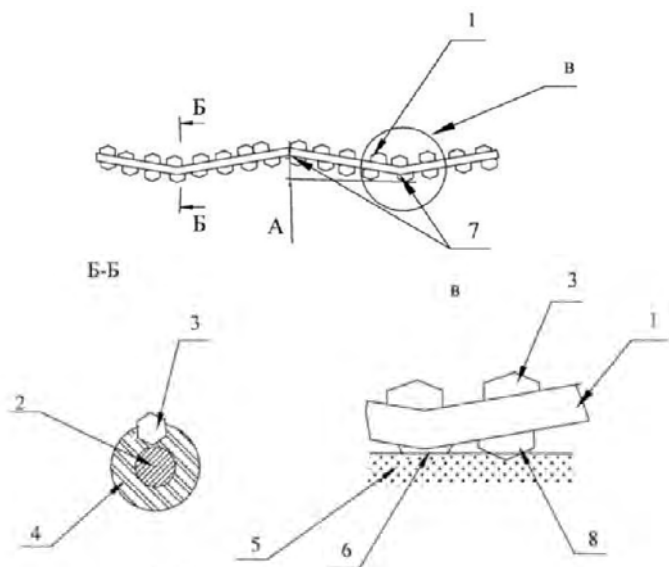


Рис. 1.18. Конструкция волнообразной абразивной проволоки:

- 1 – абразивная проволока; 2 – металлическая основа; 3 – зерна алмазов;
- 4 – периферийный слой; 5 – заготовка; 6 – рабочие алмазы; 7 – зона перегиба;
- 8 – рабочие алмазы

Высокая скорость резания обеспечивается благодаря тому, что за счет волнообразного профиля алмазной проволоки появляется возможность создавать большое удельное давление нарезаемой заготовки без увеличения натяжения проволоки. Это увеличивает глубину царапины, а соответственно, скорость резания. Возможность создания больших удельных давлений нарезаемую заготовку без увеличения натяжения проволоки позволяет также снижать потери разрезаемого материала за счет применения проволоки меньшего диаметра.

Превосходя другие способы распиливания по экономичности и качеству поверхности реза, а также возможности обрабатывать ис-

ходные заготовки больших размеров, способ абразивной резки проволокой находит все большее применение в производстве, в частности, в электронной технике при разделении слитков монокристаллов полупроводниковых материалов на пластины [13].

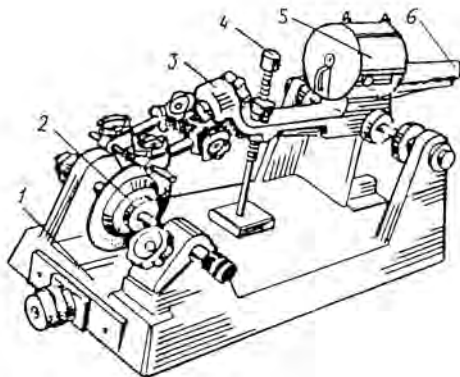
Весьма специфическими технологическими особенностями характеризуется способ механического распиливания кристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий. Во-первых, это уникальная твердость обрабатываемого материала, а во-вторых, его очень высокая стоимость, что накладывает весьма жесткие требования по минимизации безвозвратных потерь этого сырья в процессе распиливания. Кроме того, применяемая в этом случае технологическая схема механического распиливания отличается от всех рассмотренных выше. В этой связи, оправдано более подробно рассмотреть вопросы технологии и оборудования, относящиеся к распиливанию (разделению) кристаллов алмаза.

1.6. Характеристика технологической операции механического распиливания кристаллов алмаза

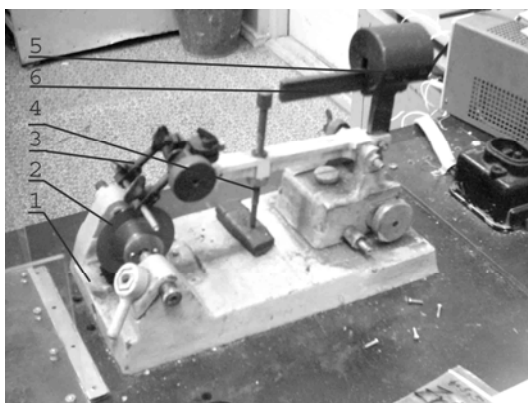
1.6.1. Назначение, применяемое оборудование и требования, предъявляемые к операции распиливания кристаллов алмаза

Распиливание кристаллов алмаза – операция, необходимая для их разделения на части с целью рационального использования сырья при его переработке в бриллианты. Согласно [14], технологический процесс изготовления бриллиантов включает ряд операций, базирующихся на процессах изнашивания: распиливание кристаллов, подшлифовка, обточка, огранка (шлифование и полирование). Несмотря на то, что на операцию распиливания приходится до 5–7 % общей трудоемкости изготовления бриллиантов [14], она в значительной степени определяет форму и размеры готового изделия. Необходимо отметить, что сложность и трудоемкость процесса распиливания кристаллов алмаза вызвана его уникальными физическими свойствами и строением кристаллической решетки [15–18]. Целью операции их распиливания является получение из монокристалла полуфабрикатов максимальной массы. Это вызвано стремлением сократить потери сырья на последующих стадиях обработки и увеличить стоимость готового изделия.

Распиливание кристаллов алмаза выполняется на многосекционном распиловочном станке мод. ШП-2. Станок состоит из массивной чугунной станины и десяти распиловочных секций с индивидуальными приводами. На рисунке 1.19 приведены схема и фотография общего вида распиловочной секции станка модели ШП-2. Станина распиловочной секции представляет собой литую плиту с двумя парами стоек.



а



б

Рис. 1.19. Станок модели ШП-2: а – схема; б – фотография общего вида одной распиловочной секции; 1 – плита; 2 – шпиндель; 3 – стрела; 4 – опорный винт; 5 – оттарированный груз; 6 – шкала

В передней паре стоек в подшипниках скольжения вращается шпиндель 2 с распиловочным диском. Задняя пара стоек станины распиловочной секции служит для установки стрелы 3 с оправками, в которых закрепляется алмаз. Во время работы стрела поддерживается в рабочем положении опорным винтом 4, который, по мере распиливания, периодически выворачивается. Левая оправка с вклеенным кристаллом алмаза закрепляется в шарнирном устройстве стрелы, а правая служит для его поджима. Горизонтальное перемещение стрелы, а также шарнирное устройство на ней позволяют точно совмещать плоскость распиливания кристалла с плоскостью диска.

Задание определенного усилия прижима кристалла к распиловочному диску осуществляется передвижением оттарированного груза 5 по шкале 6, проградуированной в граммах.

Шпиндельный узел (рисунок 1.20 и 1.21) состоит из вала с жестко закрепленным на нем фланцем. На вал устанавливается распиловочный диск и зажимается между съемным и неподвижным фланцами. Рабочие конуса шпинделя, для повышения их износостойкости и снижения сил трения в подшипниках скольжения, изготавливаются из твердого сплава ВРС6. Вращение шпинделю передается от электродвигателя посредством плоскоременной передачи.

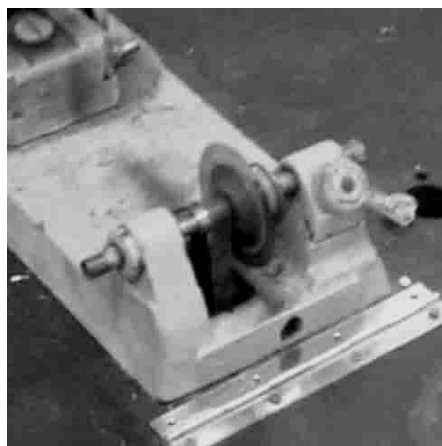


Рис. 1.20. Шпиндельный узел станка мод. ШП-2

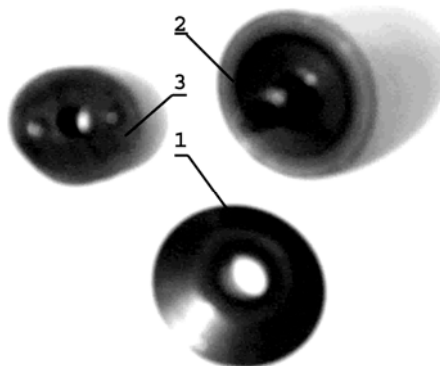


Рис. 1.21. Шпиндельный узел в разобранном виде:
1 – съемный фланец; 2 – вал шпинделя; 3 – зажимная гайка

На боковых поверхностях распиловочного диска изготовленного из бронзы, гальванопластикой, либо шаржированием сформирован алмазосносный слой (рисунок 1.22). Выполненные в центре диска радиальные разрезы исключают возможность его деформации в процессе зажима между фланцами шпинделя.

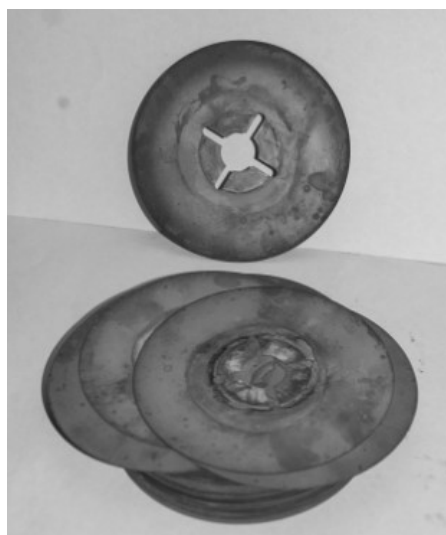


Рис. 1.22. Режущий инструмент, применяемый на операции
распиливания кристаллов алмаза

Операция распиливания кристаллов алмаза включает в себя два перехода: подрез и распиливание. После ориентации кристалла алмаза его предварительно подрезают на глубину 1–1,5 мм, чтобы обеспечить совпадение плоскости распиливания с линией разметки. Для этого используется подрезной диск, большей, чем распиловочный, толщины. Его диаметр выбирают таким образом, чтобы подрезной диск выступал за фланцы не более, чем на 1,5–2 мм. После подреза данный диск заменяют рабочим и производят распиливание.

Согласно [19], потери алмазного сырья при распиливании зависят от толщины распиловочного диска, характеристик его алмазного слоя и размера кристалла алмаза. Поэтому методика расчета технически обоснованных норм потерь учитывает два основных фактора: размеры площади распиливания кристаллов и толщину распиловочного диска. Формула для расчета норм потерь при распиливании $\Pi_{ал}$ имеет вид

$$\Pi_{ал} = (\Delta h + 0.005 + h)\rho_{ал} \frac{S_1 + S_2}{2}, \quad (1.1)$$

где Δh – приращение толщины диска за счет создания алмазного слоя;

$R_a = 0,005$ мм – допускаемая величина микронеровностей плоскости распиливания;

h – толщина заготовки распиловочного диска;

S_1 и S_2 – площади плоскостей распиливания;

$\rho_{ал}$ – плотность алмаза.

Из формулы (1.1) следует, что повышение выхода годного для механического распиливания кристаллов алмаза может быть достигнуто только уменьшением толщины режущей кромки распиловочного диска, т.е. уменьшением суммы $(\Delta h + 0,005 + h)$. Таким образом, для уменьшения безвозвратных потерь на операции распиливания необходимо, чтобы толщина режущего инструмента была минимальна. Для алмазных заготовок различной массы применяют следующие толщины распиловочных дисков согласно таблице 1.3 [14].

Таблица 1.3 – Рекомендуемые толщины режущих инструментов на операциях подреза и распиливания

Масса обрабатываемого кристалла, кар	Толщина под-резного диска, мм	Толщина распиловочного диска, мм
До 1,00	0,06	0,05
1,01–2,00	0,07	0,06
Свыше 2,00	0,08	0,07

Указанные толщины распиловочных дисков необходимы для того, чтобы в процессе распиливания обработанные площадки полуфабрикатов удовлетворяли следующим требованиям:

- на плоскости распиливания не должно быть сколов, "столбиков", раковин, следов подреза, заходящих на поверхность будущего бриллианта; глубоких рисок, "ступенек", вызывающих дополнительные потери при их выведении (при шлифовании площадок бриллианта);

- плоскость распиливания не должна иметь искривлений (вогнутости или выпуклости).

Таким образом, к операции распиливания кристаллов алмаза предъявляются следующие основные требования. Во-первых, необходимо обеспечить высокую производительность процесса при минимальных потерях алмазного сырья, а во-вторых – высокое качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов с целью минимизации потерь алмазного сырья на последующей операции их подшлифовки.

1.6.2. Влияние режимов распиливания на производительность и качество обработанных кристаллов алмаза

Эффективность операции механического распиливания кристаллов алмаза во многом определяется значениями технологических параметров, к основным из которых относятся: усилие прижима алмаза к распиловочному диску (P), скорость резания (V), тип и зернистость используемого алмазного микропорошка, а также периодичность дополнительного шаржирования в процессе обработки.

Согласно [14], существует прямо пропорциональная зависимость между значением статической нагрузки на обрабатываемый кристалл и производительностью распиливания, что вызвано возрастанием напряжений растяжения на обрабатываемой поверхности заготовки с увеличением давления на кристалл. Кроме того, с ростом статической нагрузки зерна алмаза, участвующие в процессе обработки, глубже проникают в поверхность распиливаемого алмаза и, тем самым, производят большую работу по съему обрабатываемого материала.

Оптимальная величина усилия прижима алмаза к режущему инструменту определяется несколькими факторами: материалом распиловочного диска, его толщиной и вылетом из зажимных фланцев, скоростью резания и др. Для типичных режимов обработки величина статической нагрузки колеблется в пределах от 1,2 до 3,0 Н. В случае превышения оптимального значения усилия прижима происходит потеря устойчивости распиловочного диска, которая может привести к разрыву режущего инструмента или отклонению плоскости распиливания от линии разметки, что вызовет формирование дефектов на площадках обработанных полуфабрикатов. Кроме этого, повышенная статическая нагрузка на кристалл является одной из основных причин появления глубоких рисок на поверхности распиливания.

Не меньшее влияние на показатели процесса распиливания оказывает скорость вращения распиловочного диска. При низких ее значениях (15–20 м/с) наблюдается снижение производительности распиливания, что вызвано малой частотой воздействия зерен абразива на обрабатываемый кристалл алмаза. Кроме того, повышается вероятность потери устойчивости режущего инструмента, что вынуждает уменьшать усилие прижима заготовки к диску и, как следствие, приводит к дополнительному снижению производительности процесса. Увеличение скорости резания свыше 45–50 м/с также сопровождается снижением интенсивности резания. Это связано с увеличением центробежных сил, действующих на алмазные зерна, находящиеся на торце режущего инструмента, что приводит к усилению выброса частиц из зоны обработки. Кроме того, очень высокая частота вращения распиловочного диска вызывает повышение уровня вибраций, возникающих вследствие небаланса шпиндельного узла и ротора электродвигателя. В результате, под их действием

будет происходить периодический отрыв кристалла алмаза от распиловочного диска в процессе обработки. Такое взаимодействие режущего инструмента и кристалла алмаза вызывает периодическое изменение силы прижима, обуславливая уменьшение ее среднего значения, что также приводит к снижению производительности обработки. Кроме того, повышенный уровень вибрации, согласно [14], вызывает ухудшение качества распиленных поверхностей полуфабрикатов. Поэтому на практике оптимальное значение скорости резания при распиливании кристаллов алмаза находится в диапазоне 40–50 м/с [14].

Кроме вышеуказанных факторов, на значение производительности влияет марка и зернистость используемого алмазного микропорошка, а также периодичность шаржирования режущего инструмента, определяющая концентрацию алмазных зерен в зоне обработки. Однако, с увеличением зернистости и уменьшением периода шаржирования, при увеличении производительности, наблюдается снижение качества обработанной поверхности. Поэтому выбор значений указанных параметров производится индивидуально для каждого обрабатываемого кристалла с учетом опыта распиловщика.

1.6.3. Современные представления о механизме разрушения кристалла алмаза в процессах механической обработки

Вопросы изнашивания алмаза имеют большое практическое значение с точки зрения как механической обработки алмаза, так и применения его для обработки других материалов. Учитывая широкое применение алмаза в промышленности, при резании труднообрабатываемых материалов, большинство работ посвящено процессам контактного взаимодействия и процессам износа, происходящим при взаимодействии алмазного режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой.

Существует большое количество теорий, объясняющих механизм разрушения алмаза в процессе обработки, в основу которых положены две принципиально различные гипотезы. Первая сводится к тому, что в процессе изнашивания кристаллов алмаза преобладают термохимические явления, а в основу второй положены процессы механического разрушения алмаза.

Сторонники первой гипотезы [20–24] полагают, что обработка алмаза обусловлена его окислением при высоких температурах или термическими процессами, т.е. превращением алмаза в графит или аморфный углерод. Данные процессы происходят вследствие развития высоких температур при трении в процессе обработки. В частности, в работе [20] показано, что износ алмаза имеет термическую природу, так как происходит карбонизация поверхностей алмаза. Полученные авторами [21] результаты подтвердили возможность шлифования и полирования алмаза трением по стеклу. Известны работы [22, 23], в которых были проведены опыты, показавшие возможность распиливания кристаллов алмаза на нешаржированных дисках из материалов, твердость которых значительно меньше твердости алмаза. Кроме того, известны исследования, в ходе которых добились значительного увеличения съема алмаза на ограниченном диске за счет его подогрева [24]. Однако теория теплого изнашивания алмаза имеет и слабые стороны, в частности, она не может дать однозначного объяснения влияния анизотропии на интенсивность процесса изнашивания [20].

Механическая теория изнашивания кристаллов алмаза основывается на исключении возможности превращения алмаза в графит в процессе обработки. Она строится на предположении, что износ алмаза обусловлен процессом механического скалывания. Обоснованию этой теории посвящены работы [25–29], в которых приводится предположение, что съем алмаза с обрабатываемой поверхности происходит за счет удаления мельчайших частиц («блоков»), из которых состоит кристалл алмаза. Анизотропия обрабатываемости различных плоскостей алмаза объясняется с позиций механики. Авторы [26–28] полагают, что в процессе изнашивания алмаза основную роль играет микрорастрескивание с образованием микроскопов, не исключая и пластическую деформацию.

Наиболее полно процессы, происходящие при распиливании кристаллов алмаза, отражены сторонниками комбинированной теории механизма изнашивания [30–32]. Авторы считают, что при низкой скорости обработки разрушение алмаза происходит за счет образования трещин на его поверхности. При высоких скоростях, когда в зоне контакта зерна с обрабатываемой поверхностью возникают локальные точки с температурой выше 1270 К, имеет

место графитизация алмаза в виде отдельных ядер графита, которые затем удаляются в процессе обработки.

Каждому процессу изнашивания соответствует характерный вид поверхности: адгезионному – бугристая поверхность; абразивному – риски, параллельные вектору скорости резания; диффузионному – полированная, гладкая площадка; комбинированному – комбинация соответствующих видов поверхности.

Адгезионное изнашивание представляет собой удаление материала с контактных поверхностей вследствие среза и отрыва, вызванных адгезионными явлениями. Особенно интенсивно процессы схватывания и адгезионного изнашивания проявляются при наличии значительной пластической деформации или при совместном воздействии повышенной температуры и пластической деформации [30, 32]. По данным [31], размеры локальных адгезионных пятен при обработке кристаллов алмаза составляют 1–10 мкм, а реальная площадь контакта – 10–60% номинальной.

В механизме адгезионного изнашивания решающее значение имеет величина касательных напряжений, возникающих в контакте и зависящих от механических характеристик обрабатываемого материала [33], а также принадлежность контактирующего с алмазом металла к одной из групп, отличающихся относительной температурой начала адгезии [34].

Абразивное изнашивание представляет собой механическое изнашивание материала в результате режущего и царапающего воздействия твердых тел или частиц. При температуре контакта в процессе механического распиливания кристаллов алмаза не превышающей 300–350 К абразивное изнашивание алмаза маловероятно, так как при этом его твердость выше твердости любых включений [30, 33]. При высоких температурах контактирующих поверхностей возможно абразивное изнашивание алмаза. Следует отметить тесную взаимосвязь механизма абразивного изнашивания и изнашивания алмазного абразивного инструмента [31, 35–44].

Диффузионное изнашивание происходит при взаимной растворимости материалов контактирующих тел. В работах [28, 33, 45] показано, что оно может стать доминирующим при высоких температурах контакта, химическом сродстве контактирующих материалов и наличии ювенильных поверхностей. Данные результаты были подтверждены в работе [34], посвященной вопросам эвтектического

плавления алмаза и графита с металлами. В ней показано, что одним из видов взаимодействия материалов при высоких температурах является контактное эвтектическое плавление. Кроме того, установлено, что происходит образование эвтектических сплавов металлов триады железа (железо, кобальт, никель) с углеродом, температура плавления которых значительно ниже, чем входящих в их состав металлов и углерода. При этом выдвинуто предположение, что алмаз непосредственно в плавлении не участвует, так как при контакте вначале происходит его графитизация, а затем последующее эвтектическое плавление железа с графитом. Однако скорость графитизации алмаза в эксперименте при 1423 К очень мала по сравнению со скоростью эвтектического плавления. Это служит доказательством того, что в контакте с железом плавится именно алмаз, т.е. реализуется диффузионный механизм изнашивания. Следует также обратить внимание на следующее обстоятельство. При высоких температурах, достигающих температуры плавления одного из контактирующих материалов, скорость диффузионного растворения может возрасти в миллионы раз. Известно, что начальному периоду диффузии соответствует наибольшая скорость растворения [46]. Диффузионный износ алмаза отмечен после распада кристаллической решетки, когда атом углерода диффундирует в обрабатываемый материал [20–22, 46–49]. Достигая при нагреве на воздухе температуры выше 1200 К, алмаз начинает окисляться. В случае же контакта его со сталью, никелем и кобальтом имеет место интенсивное диффузионное изнашивание [30, 33, 50]. Для уменьшения этого процесса применяют охлаждение зоны резания с помощью жидкой углекислоты, сухого льда, керосина, воздухом или путем регулирования параметров обработки, а именно снижением скорости резания. При этом замечено, что интенсивность диффузионного изнашивания алмаза в контакте с железоуглеродистыми сплавами не зависит от ориентации, а, следовательно, и от твердости обрабатываемого материала в зоне контакта.

Из полученных в работе [31] результатов следует, что интенсивность изнашивания алмаза прямопропорциональна температуре плавления контактирующего с ним металла. Замечено также, что применение защитной атмосферы из азота, по сравнению с кислородом и воздухом, повышает скорость изнашивания алмаза. Из полученных результатов следует важный практический вывод о том,

что при трении и изнашивании алмаза существенную роль играет химическая природа металла в контакте, а также атмосфера, в которой происходит изнашивание.

Таким образом, в результате анализа приведенных выше работ можно сделать вывод, что трение и изнашивание алмаза представляет собой совокупность взаимосвязанных физико-механических и термохимических процессов. При этом степень их проявления в зависимости от конкретных условий может существенно изменяться, обуславливая протекание различных видов изнашивания.

1.6.4. Особенности механизма разрушения кристалла алмаза в процессе его распиливания

Вследствие уникальности физико-механических свойств, алмаз, с точки зрения его обработки, является самым нетехнологичным и труднообрабатываемым из всех известных в природе и созданных искусственно материалов. Как показано в работах [24, 31], коэффициент трения алмаза на воздухе составляет от 0,06–0,08 до 0,12–0,25 для различных материалов. Следует отметить, что поверхности, характеризующиеся низким коэффициентом трения, трудно подвергаются обработке.

Исследованию механизма разрушения кристаллов алмаза, с учетом указанных выше особенностей процесса распиливания, посвящены работы [14, 51–54]. Авторы [51, 52] рассматривают абразивную теорию обработки, которая объясняет изнашивание алмаза его сгоранием или превращением в графит, происходящим в зоне резания в результате локального перегрева. В этой теории учитываются также процессы пластической деформации в распиливаемой заготовке. Однако был проведен ряд исследований, посвященных изучению влияния высоких скоростей вращения диска на интенсивность съема алмаза [53]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что фактическое увеличение интенсивности крайне мало по сравнению с увеличением, ожидаемым с позиций теории термохимического изнашивания. Таким образом, авторами был сделан вывод о доминирующей роли механического разрушения.

Авторами [54] была проведена серия экспериментов с целью исследования абразивного разрушения алмаза в реальных условиях распиливания и получены доказательства ведущей роли механизма

хрупкого разрушения при обработке. Так, поверхность алмаза после распиливания имела сложный профиль с неровностями различных масштабов. Поверхности реза были выпуклыми или вогнутыми, при этом наблюдался "волнообразный" рельеф в направлении движения распиловочного диска. Микронеровности представляли собой широкие ступеньки, углубления и выступы высотой 0,3–2 мкм с расстоянием между неровностями 0,1–0,5 мкм. Риски имели высоту 0,05–1 мкм с шагом 3–5 мкм.

Наиболее полно картина взаимодействия зерен алмазных микропорошков с обрабатываемой поверхностью в процессе механического распиливания кристаллов алмаза представлена в работе [14]. По мнению авторов, алмазные зерна вместе со связкой образуют монослой абразивной массы, который формируется между вращающимся диском 1 и неподвижным кристаллом 2, как показано на рисунке 1.23.

Зерна абразива, перекатываясь и временно закрепляясь на поверхности диска, периодически разрушают алмаз. Нагрузка, при воздействии на алмаз свободно движущихся абразивных частиц, носит импульсный ударный характер.

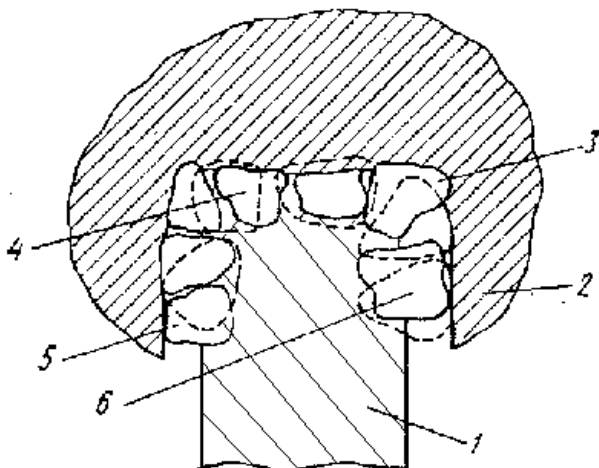


Рис. 1.23. Схема расположения алмазных зерен на режущей кромке диска:
1 – режущий диск; 2 – кристалл алмаза; 3–6 – зерна абразива

В процессе механического распиливания кристаллов алмаза абразивное (алмазное) зерно работает следующим образом [14]. Разрушение алмаза начинается с удара режущей кромки единичного абразивного зерна по обрабатываемой поверхности. В том случае, когда зерно имеет достаточный радиус закругления ρ , происходит его скольжение по обрабатываемой поверхности алмаза с возрастающим давлением, что сопровождается выделением большого количества теплоты. Данное перемещение абразивного зерна вызывает в зоне контакта растягивающие напряжения близкие к теоретической прочности алмаза, что вызывает образование полукольцевой микротрещины в заготовке. Последующие зерна абразива ее увеличивают, а также образуют другие микротрещины. Их скопление приводит к созданию на обрабатываемой поверхности алмаза предразрушенного слоя. При дальнейшем воздействии абразива некоторые частицы алмаза теряют связь с кристаллом алмаза. Скользящие с большой скоростью зерна алмазного микропорошка подхватывают эти частицы и выносят их из зоны обработки. В силу хаотического расположения зерен абразива происходит разрушение элементарных площадок, смещенных друг относительно друга. Сочетание множества микросколов создает картину царапины на поверхности алмаза.

Таким образом, в результате проведенных исследований представлен механизм разрушения кристаллов алмаза при их механическом распиливании, в основе которого лежит процесс хрупкого разрушения поверхности за счет динамического воздействия на нее зерен алмазных микропорошков, т.е. абразивное изнашивание.

1.7. Основные направления совершенствования операции механического распиливания кристаллов алмаза

Проводимые на сегодня работы по совершенствованию операции механического распиливания кристаллов алмаза можно сгруппировать по трем направлениям: автоматизация процесса, применение внешнего электрического поля для интенсификации процесса, повышение эксплуатационных показателей применяемого инструмента – распиловочного диска и сообщение обрабатываемой заготовке вынужденных колебаний. Ниже рассмотрены сущность и возможности каждого из этих направлений

1.7.1. Автоматизация процесса механического распиливания кристаллов алмаза

Совершенствование операции механического распиливания, главным образом, осуществляется за счет создания различных средств автоматизации. К данным методам относится применение систем, следящих за изменением усилия прижима алмаза к распиловочному диску и вносящих необходимые поправки для поддержания его оптимальной величины [14].

Необходимо отметить, что усилие прижима в процессе распиливания на секции станка модели ШП-2 (рисунок 1.19), которое задается грузом и корректируется вручную с помощью винта, носит непостоянный «пилообразный» характер (рисунок 1.24). Средняя величина усилия $P_{\text{ср}}$ подачи в этом случае меньше технологически обоснованной заданной величины усилия ($P_{\text{ср}} < P_{\text{зад}}$), что приводит к уменьшению интенсивности распиливания.

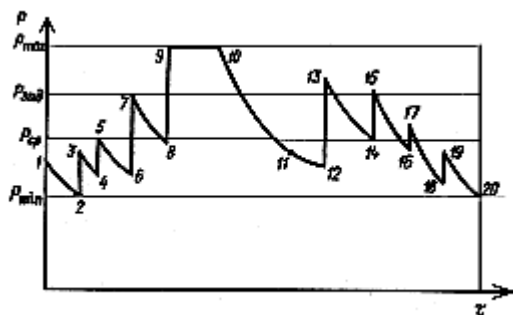


Рис.1. 24. Характер изменения усилия прижима алмаза к режущему диску за время распиливания

Анализ изменения усилия прижима алмаза к диску показывает, что в момент их соприкосновения алмаза и диска была установлена первоначальная нагрузка для подреза (рисунок 1.24, точка 1), при этом опорный винт касается эластичной прокладки. Опускание системы приводит к уменьшению установленного усилия (точка 2). Затем винт снова несколько выворачивают и тем самым увеличивают усилие (точка 3). Процесс изменения усилия повторяется (точки 4–6). После окончания подреза и замены подрезного диска на

рабочий, характер изменения усилия остается прежним (точки 7–16). Точки 9 и 10 указывают на то, что некоторое время распиливание происходит при максимальном усилии, т.е. между винтом и эластичной прокладкой есть зазор, а в точках 11 и 12 массу груза почти полностью компенсирует деформация эластичной прокладки, и процесс распиливания приостанавливается. В точке 14 винт немного выворачивают, и начинается заключительный этап распиливания (точки 14–20).

Для автоматизации механического распиливания алмазов разработана схема полуавтоматического пятишпиндельного станка для распиливания алмазов, на котором заданное усилие прижима автоматически поддерживается постоянным в течение всего процесса распиливания (рисунок 1.25).

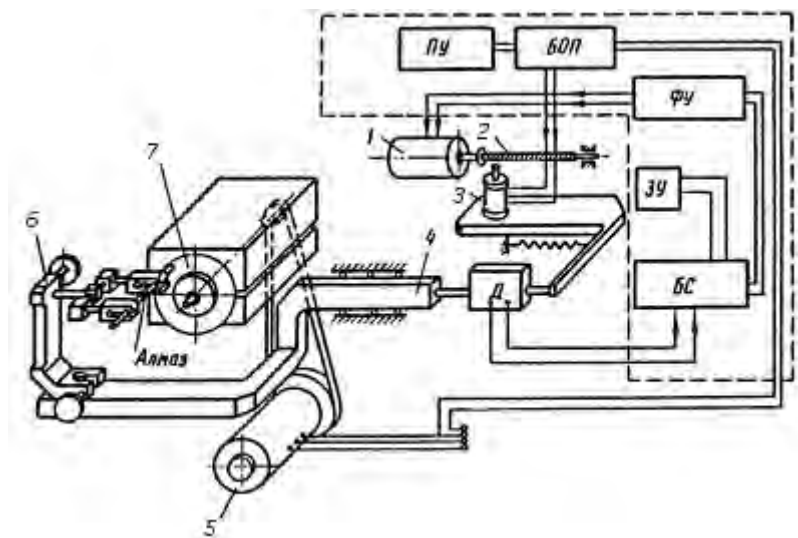


Рис. 1.25. Электромеханическая схема полуавтоматического пятишпиндельного станка: 1 – электродвигатель; 2 – винт; 3 – электромагнитная муфта; 4 – направляющая; 5 – электродвигатель; 6 – кристаллодержатель; 7 – распиловочный диск

Технологически необходимое усилие прижима устанавливается с помощью задатчика усилия ЗУ. При отсутствии сигнала Д, что соответствует нулевому значению усилия прижима алмаза к распиловочному диску,

вочному диску, блок сравнения БС выдает сигнал рассогласования, равный разности величины сигнала датчика и задатчика, на фазочувствительный усилитель ФУ, через который подается напряжение на исполнительный электродвигатель подачи 1. При включении подачи подается напряжение на электромагнитную муфту 3, которая кинематически соединяет направляющую 4 с винтом 2 исполнительного электродвигателя. При этом происходит перемещение направляющей с кристаллодержателем 6, в котором закреплен кристалл алмаза в направлении распиловочного диска 7. При поджиге алмаза к распиловочному диску датчик выдает сигнал, пропорциональный усилию прижима. Когда сигнал будет равен сигналу задатчика, напряжение на выходе усилителя будет равно нулю, вращение электродвигателя 5 прекратится, и кристалл алмаза будет распиливаться с заданным усилием. Его величина $P_{зад}$ в этом случае остается постоянной в процессе распиливания кристаллов алмаза, что приводит к повышению производительности процесса и улучшению качества распиленной поверхности.

Перед окончанием распиливания блок снижения подачи автоматически уменьшает усилие подачи до определенной величины с целью предотвращения образования скола на выходе из алмаза. По окончании распиливания блок отключения питания БОП прекращает подачу, и пружина возврата устанавливает узел кристаллодержателя в исходное положение. Управление станком осуществляется с помощью пульта управления ПУ.

Кроме того, к методам совершенствования операции механического распиливания относятся методы, позволяющие повысить устойчивость и жесткость распиловочного диска в процессе обработки [55, 56].

1.7.2. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков

Инструмент для обработки алмазов и высокотвердых материалов в основном алмазный. Он представляет собой, как правило, металлический диск, шаржированный алмазным микропорошком. В общем случае к распиловочному диску предъявляются следующие требования: стойкость к хрупкому и вязкому разрушению, износостойкость при реализации различных видов изнашивания (адгези-

онного, диффузионного, абразивного и комбинированного). Таким образом, учитывая изложенное, а также рассмотренные свойства алмаза и виды его износа и разрушения, можно сделать вывод, что для повышения производительности обработки монокристаллов алмаза необходимо создать оптимальный алмазный инструмент. В этом вопросе можно выделить два аспекта: алмазное зерно (его свойства, размер, концентрация и т.д.) и связку. Причем следует учитывать, что срок службы и стоимость инструмента определяются в основном связкой.

При низкой твердости связки зерна углубляются, не производя резания, а при высокой твердости происходит их интенсивное разрушение [57]. Если связка изнашивается быстрее абразива, то он будет выпадать, если медленнее – эффективность обработки снижается вследствие полировки связки.

Классификации покрытия режущего инструмента и их влиянию на процесс механического распиливания кристаллов алмаза посвящены работы [58–60].

В результате исследований [58] было установлено, что использование различных составов полимерной связки позволяет изменять время распиливания одной партии кристаллов (10 шт.) в пределах 10 мин, а применение в качестве наполнителей дисульфида молибдена вместе с графитом повышает качество распиливания, что позволяет снизить потери на последующих операциях.

Кроме работ по определению оптимального состава связки, известны попытки использовать в процессе шаржирования распиловочных дисков их виброударное взаимодействие с деформирующим инструментом [61–63].

В настоящее время на алмазообрабатывающих предприятиях для шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков алмазным микропорошком применяется оборудование, реализующее способ втирания алмазных зерен вращающимися стальными или твердосплавными пластинами – шайбами.

Авторами [62] для повышения качества процесса шаржирования было предложено использовать двухстороннюю схему ультразвукового шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков. Это позволило избавиться от ряда существенных недостатков, характерных для одностороннего шаржирования, среди которых – применение ручного труда для смены положения диска при шаржи-

ровании его обеих сторон и "выбивание" алмазных частиц с противоположной, уже предварительно обработанной, боковой поверхности диска в процессе шаржирования.

В результате проведенных комплексных исследований [62] была разработана технология и создано оборудование для двухстороннего виброударного шаржирования боковых поверхностей бронзовых распиловочных дисков.

При распиливании кристаллов алмаза дисками, шаржированными по этой технологии, по сравнению с базовыми дисками Смоленского завода "Кристалл" получены следующие результаты:

- повышение интенсивности распиливания на 3,82–4,11 %;
- повышение производительности труда на 1,4–4,12 %;
- повышение выхода годного сырья на операциях «распиливание» и «подшлифовка площадок» на 0,33–0,66%;
- повышение производительности труда на операции «подшлифовка площадок» после распиливания «опытными» дисками на 2,7%.

Вместе с тем, значительно большими потенциальными возможностями повышения интенсивности распиливания твердых и сверхтвердых материалов и качества поверхности реза является направления, связанные с введением в зону обработки вынужденных колебаний путем их сообщения инструменту или обрабатываемой заготовке.

1.7.3. Применение внешнего электрического поля для интенсификации процесса механического распиливания кристаллов алмаза

Установлено [64–66], что процесс распиливания характеризуется возникновением в цепи «алмаз–инструмент–земля» электрического тока до нескольких сот наноампер, абсолютная величина и направление которого зависят от физико-химических свойств материала связки абразивного слоя распиловочного диска, а также от режимов распиливания и электрической схемы контактирования. Как показали исследования по распиливаю алмазов [67, 68], данное явление существенно влияет на производительность процесса механической обработки и на стойкость режущего инструмента (рисунок 1.26).

Механизм, приводящий к увеличению производительности, в данном случае можно описать следующим образом. Разрушение кристаллов алмаза обусловлено механическим воздействием абразива, процессами диффузионного (термоокислительного) и адгезионного изнашивания. Известно [64, 69–71], что локальные поля микроконденсаторов, образующиеся в зоне контакта при динамическом взаимодействии твердых тел, активируют процессы диффузии и фрикционного переноса вещества, в значительной мере усиливая их разрушение. Таким образом, упрощенно монокристалл алмаза можно рассматривать как заряженный конденсатор, состоящий из зон с низким и высоким электрическим сопротивлением. Тогда в процессе трибоэлектризации алмаза при его обработке потенциал электрического поля будет распределен неравномерно. Возникновение высоких электрических потенциалов на границе проводящих и непроводящих зон кристалла вызовет пробой среды, нуклеацию и зарождение микротрещин, которые будут способствовать повышению интенсивности распиливания монокристаллов алмаза при оптимальных технологических режимах.

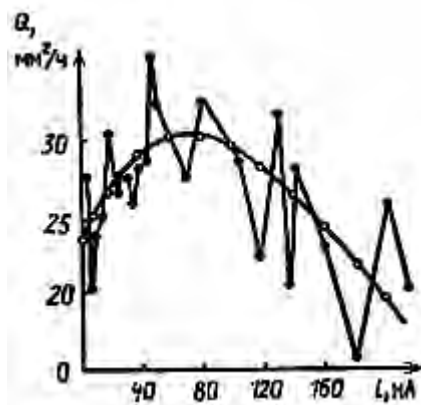


Рис. 1.26. Зависимость производительности распиливания Q от средней величины тока электризации i и параболическая кривая, аппроксимирующая эту зависимость (шаржирование режущих дисков пастой на касторовом масле)

Таким образом, исходя из электромеханической теории изнашивания, при трении и резании твердых тел [72–74] наблюдаемое воз-

растание интенсивности изнашивания при увеличении тока электризации можно объяснить его активирующим влиянием на процессы адсорбционного снижения прочности кристаллов при их контакте с полимером, диффузионного и адгезионного изнашивания, а также электроэрозионного разрушения кристаллов алмаза.

По результатам исследований авторами [75–77] разработана конструкция шпиндельного узла для распиливания кристаллов алмаза, в которой используется эффект влияния внешнего электрического поля на процесс электризации. Распиловочный диск 5 (рисунок 1.27) с алмазосодержащим диэлектрическим покрытием 4 помещается во внешнее электрическое поле, создаваемое прокладками – электретами, и электрически соединяется с "землей".

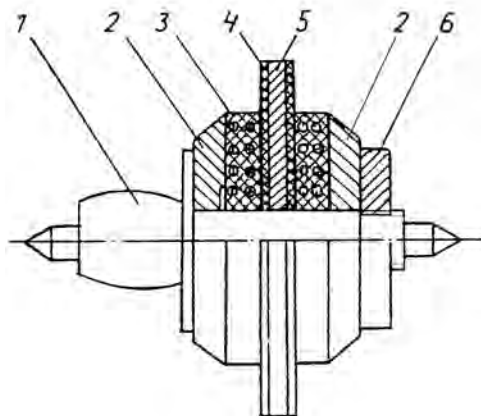


Рис. 1.27. Конструкция шпинделя с электретными прокладками: 1 – вал; 2 – фланцы; 3 – диэлектрические прокладки из полимерного электрета; 4 – диэлектрический слой; 5 – режущая пластина распиловочного диска; 6 – прижимная гайка

Благодаря этому он приобретает определенный заряд. Его величина зависит от емкости распиловочного диска и напряженности электростатического поля. Толщина прокладок из фторопласта составляет 0,01–1 мм, а толщина алмазосодержащего композиционного покрытия диска – 1–50 мкм. По результатам испытаний было установлено, что в сравнении с обычными условиями такой инструмент позволяет на 10–20 % повысить интенсивность распи-

ливания, на 0,1 % увеличить выход годного и при этом снизить уровень шума на 5 дБ [67, 68]. Однако помимо положительных эффектов при данном способе распиливания наблюдался и отрицательный – существенное снижение стойкости инструмента [67, 78]. Кроме того, при больших значениях тока электризации наблюдается уменьшение скорости распиливания, обусловленное ухудшением режущих свойств распиловочного диска. Из-за нестабильности характеристик электретенных прокладок и сложной технологии формирования на дисках полимерного алмазосодержащего покрытия, этот способ распиливания кристаллов алмаза пока не нашел широкого практического применения.

1.7.4. Совершенствование оборудования для механического распиливания кристаллов алмаза по традиционной технологической схеме

Необходимо подчеркнуть, что все выполненные работы по совершенствованию конструкции распиловочной секции были главным образом направлены на обеспечение автоматического управления в процессе распиливания величиной статического усилия прижатия кристалла к режущей кромке распиловочного диска. Как указывалось выше, при постоянной скорости резания этот параметр режима обработки является единственным, позволяющим активно влиять на условия протекания процесса распиливания.

На рисунке 1.28 представлен вариант конструкции распиловочной секции, обеспечивающий автоматическую подачу кристалла в процессе обработки [79].

Она состоит из основания 1, на котором шарнирно закреплена консольная стрела 8 с держателем кристалла алмаза 6, опирающаяся на втулку устройства автоматической подачи 2 кристалла алмаза на распиловочный диск 3. Шпиндель 4 с закрепленным в нем распиловочным диском 3 вращается в графитовых подшипниках 5, установленных в стойках основания 1.

Работает распиловочная секция следующим образом. Оправку 9 с закрепленным в ней кристаллом алмаза 10 фиксируют в зажиме 14 держателя кристалла алмаза 6. Оправкой 11 прижимают кристалл и фиксируют в зажиме 12. Термодатчик 13 закрепляют на оправке 9.

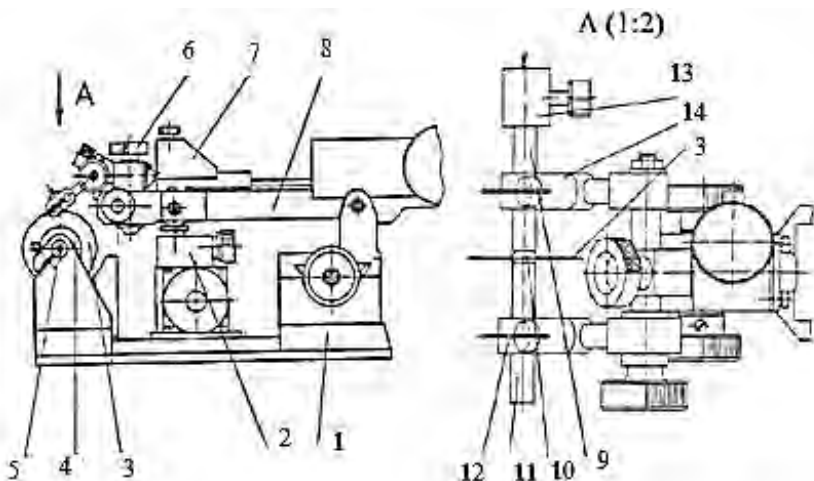


Рис. 1.28. Принципиальная схема распиловочной секции с устройством автоматической подачи кристалла алмаза: 1 – основание; 2 – устройство автоматической подачи кристалла алмаза; 3 – распиловочный диск; 4 – шпиндель; 5 – графитовые подшипники; 6 – держатель кристалла алмаза; 7 – груз; 8 – шкала стрелы; 9, 11 – оправка; 10 – кристалл алмаза; 12, 14 – зажим; 13 – термодатчик

Установкой груза 7 на соответствующее деление шкалы стрелы 8 задают необходимое усилие прижима кристалла к распиловочному диску 3 и включают режим автоматического распиливания.

Шаговый двигатель 15 (рисунок 1.29) устройства автоматической подачи 2 кристалла алмаза (рисунок 1.24) на распиловочный диск 3 через червячную передачу приводит в движение ходовой винт 16, вращение которого преобразуется в поступательное движение втулки 18.

Подпружиненный ролик 17 предохраняет втулку от проворачивания. Если в процессе распиливания температура кристалла алмаза превысит допустимую, то по сигналу термодатчика 13 преобразователь частоты питания электродвигателя привода вращения распиловочного диска уменьшает скорость его вращения.

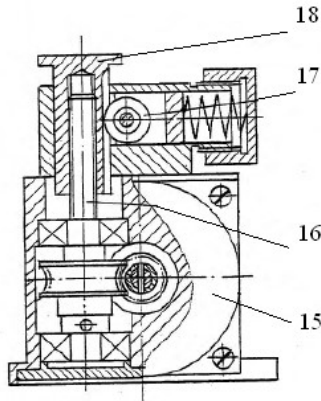


Рис. 1.29. Конструкция устройства автоматической подачи кристалла алмаза:
 15 – шаговый двигатель; 16 – ходовой винт; 17 – подпружиненный ролик;
 18 – втулка

Авторами [80] предложена оригинальная конструкция распиловочной секции с «ломающей» консольной стрелой, обеспечивающая автоматическое управление усилием прижатия кристалла к диску. Ее принципиальная схема представлена на рисунке 1.30.

Секция содержит основание 6, по которому движется клин 5 под действием винта 3, приводимого во вращение шаговым двигателем 21 через коническую зубчатую пару 2, причем крайнее положение клина 5 определяется конечными выключателями 4. При движении клина вперед-назад пята 7 движется по колонкам 8 вверх-вниз и через ролик 15 приподнимает или опускает левую часть стрелы 19 и ее правую часть 22, причем левая часть стрелы может поворачиваться – «ломаться» вокруг оси 16, которая неподвижно соединена с рычагом 18, по которому перемещается противовес 17.

На левой части стрелы 19 закреплены устройство 14 крепления оправок 12 с кристаллом алмаза 11 и электроконтакт 13. Электроконтакт (плоская пружина) 23 крепится к правой части стрелы 22, а микропереключатель 24 расположен на стойке 1.

Работает секция следующим образом. С помощью клея предварительно устанавливают кристалл 11 в оправку 12, а потом на устройстве 14 крепления оправок. Затем включают привод вращения распиловочного диска 10. Перемещая противовес 17 по рычагу 18, задают усилие резания.

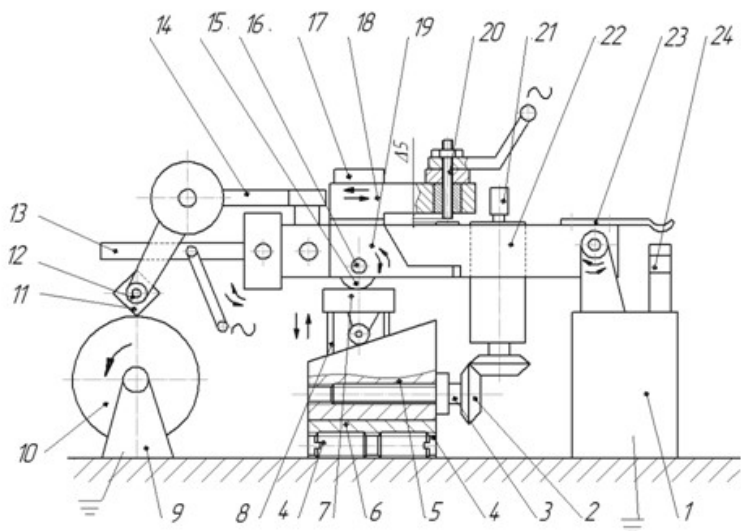


Рис. 1.30. Принципиальная схема распиловочной секции с «ломающейся» консольной стрелой: 1 – стойка; 2 – коническая зубчатая пара; 3 – винт; 4 – конечные выключатели; 5 – клин; 6 – основание; 7 – пята; 8 – колонки; 9 – привод вращения аспилового диска; 10 – распиловочный диск; 11 – кристалл алмаза; 12 – оправка; 13, 20, 23 – электроконтакт; 14 – устройство крепления; 15 – ролик; 16 – ось; 17 – противовес; 18 – рычаг; 19 – левая часть стрелы; 21 – шаговый двигатель; 22 – правая часть стрелы; 24 – микропереключатель

На пульте управления задают величину микроподачи и опускают электроконтакт 13 на алмаз 11. Процесс распиливания алмаза происходит с заданной величиной микроподачи и определенной нагрузкой. При этом обеспечивается условие $v_1 = v_2$, где v_1 – скорость распиливания; v_2 – скорость микроподачи. При этом скорость микроподачи заведомо устанавливается больше v_1 с учетом того, что скорость распиливания на краях больше скорости распиливания в середине кристалла алмаза. При нарушении указанного выше равенства, т.е. $v_1 < v_2$, происходит суммирование микроподачи, увеличивается нагрузка кристалла алмаза на распиловочный диск, что может привести к разрыву последнего и выбросу кристалла алмаза из оправки. В этом случае между роликом 15 и пятой 7 образуется зазор, левая часть стрелы 19 поворачивается («ломается») вокруг оси 16 вместе с рычагом 18 и электроконтакт 20 замы-

кается на массу, шаговый двигатель 21 отключается, микроподача прекращается, что исключает выброс кристалла из оправки. По мере распиливания зазор между роликом 15 и пятой 7 исчезает, а зазор между электроконтактом 20 и массой восстанавливается. После этого включается на заданную величину микроподачи шаговый двигатель 21 и процесс обработки продолжается. В результате скорость микроподачи кристалла алмаза на распиловочный диск автоматически согласуется с максимально допустимой скоростью распиливания кристалла, так как площадь распиливания кристалла алмаза изменяется от минимальной к максимальной и от максимальной к минимальной.

При завершении процесса распиливания кристалла алмаза распиловочный диск 10 касается электроконтакта 13, микроподача прекращается и на пульте управления включается индикация, сигнализирующая об окончании процесса распиливания. После этого поднимают стрелу, фиксируя ее в определенном положении с помощью фиксатора (на рисунке он не показан), плоская пружина 23 касается микропереключателя 24, включая шаговый двигатель 21, который перемещает клин 5 в левое крайнее положение, фиксирующееся конечными выключателями 4. Далее процесс распиливания повторяется при обработке следующего кристалла алмаза.

На рисунке 1.31 приведена принципиальная схема еще одного варианта распиловочной секции с автоматическим управлением величиной усилия прижима кристалла к распиловочному диску, предложенная авторами работы [81].

Она содержит основание 1 с расположенным на нем распиловочным диском 10, закрепленным в стойке 9 и приводимым во вращение электродвигателем 7 через приводной ремень 8. На стойке 2 на оси установлена стрела 21, которая через пружину 16 связана с подвижной опорой 6. Последняя при помощи шагового двигателя микроподачи 5 и посредством ходового винта 4 имеет возможность перемещаться вертикально в направляющей 3. К подвижной опоре 6 крепится кронштейн 18, на котором на оси установлен рычаг 19, взаимодействующий с плавающим электроконтактом 20, смонтированным на подвижной опоре 6, и толкателем 17, закрепленным на стреле 21. На левой части стрелы закреплен узел 14 крепления оправок 12 с кристаллом 11 и держателя 15 с фотодатчиком 13. На правой части стрелы закреплены двигатель 22, который посред-

ством ходового винта 23 имеет возможность перемещать противовес 24 в горизонтальном положении по стреле, а также две контактные колодки 25 и 26, указывающие соответственно минимальное и номинальное усилия прижатия кристалла к распиловочному диску. Противовес 24 имеет электроконтакт 27, взаимодействующий с колодками 25 и 26, которые имеют возможность перемещаться.

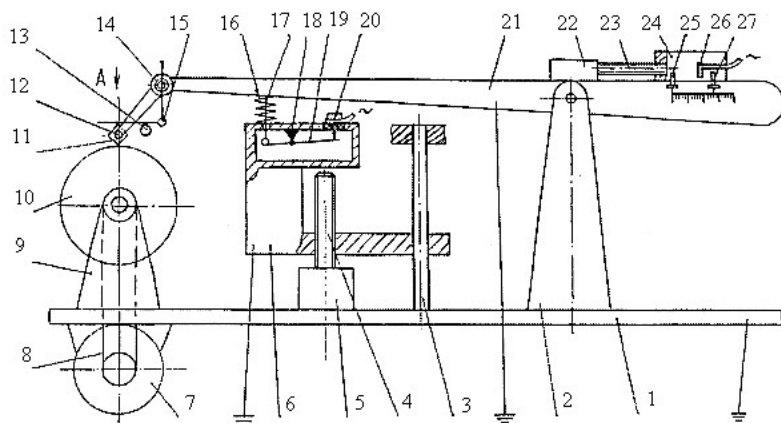


Рис. 1.31. Принципиальная схема распиловочной секции с автоматическим управлением величиной усилия прижима кристалла алмаза к распиловочному диску: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – направляющая; 4 – ходовой винт; 5 – шаговая микроподача; 6 – подвижная опора; 7 – электродвигатель; 8 – приводной ремень; 9 – стойка; 10 – распиловочный диск; 11 – кристалл; 12 – оправки; 13 – фотодатчик; 14 – узел крепления; 15 – держатель; 16 – пружина; 17 – толкатель; 18 – кронштейн; 19 – рычаг; 20 – плавающий электроконтакт; 21 – стрела; 22 – двигатель; 23 – ходовой винт; 24 – противовес; 25, 26 – контактные колодки; 27 – колодка

Работает данное устройство следующим образом. Предварительно с помощью клея устанавливают кристалл алмаза 11 в оправку 12 и закрепляют на узле 14. Затем при помощи держателя 15 устанавливают фотодатчик 13 таким образом, чтобы он находился в зоне окончания распиливания, и закрепляют его на узле 14. Колодкой 26 по шкале устанавливают минимальное усилие, а колодкой 25 – номинальное усилие резания. Включают привод 7, винт 23 перемещает противовес 24 в положение минимального усилия резания, т.е.

пока электроконтакт 27 не коснется колодки 25. После этого двигатель 22 выключается и включается двигатель 5, который посредством ходового винта опускает подвижную опору 6, а через пружину 16 и стрелу 21 до тех пор, пока кристалл алмаза 11 не коснется распиловочного диска. Начинается процесс врезания распиловочного диска в алмаз с минимальной статической нагрузкой. На пульте управления устанавливаются время врезания, величина микроподачи и время задержки ее включения, соответствующие заданному усилию резания. Выключение двигателя 5 произойдет при размыкании контакта 20. Далее процесс распиливания происходит под действием установленной нагрузки, усилие которой будет постепенно компенсироваться пружиной 16 и приближаться к нулю, что позволит распиловочному диску выпрямиться от нагрузки и принять первоначальное положение. В процессе распиливания толкатель 17, нажимая на рычаг 19, замкнет электроконтакт 20, в блоке электронного управления включается реле времени, которое в соответствии с установленной задержкой включает двигатель 5, снова опускающий стрелу вниз.

Процесс врезания продолжается до установленного времени резания, после чего на пульте управления гаснет индикация «Врезание» и загорается индикация «Распиливание». Затем выключаются двигатели 5, 22. Последний перемещает противовес 24 в положение номинального усилия резания, т.е. пока электроконтакт 27 не коснется колодки 25, после чего двигатель 22 выключается и снова включается двигатель 5, что приводит к началу распиливания кристалла с номинальным усилием резания аналогично рассмотренному.

Обработка кристалла с номинальным усилием будет происходить до тех пор, пока распиловочный диск 10 не войдет в зону окончания распиливания кристалла, когда срабатывает фотодатчик 13. На пульте управления гаснет индикация «Распиливание» и загорается индикация «Окончание распиливания». Выключается двигатель 5, включается двигатель 22, который перемещает противовес 24 в положение минимального усилия резания, т.е. пока электроконтакт 27 не коснется колодки 26, после чего двигатель 22 выключается и включается двигатель 5. Это приводит к окончанию распиливания кристалла с минимальным усилием резания.

Подводя итог настоящего подраздела, отметим, что современные распиловочные секции путем управления величиной статического усилия прижатия заготовки к режущей кромке диска дают возможность автоматизировать процесс обработки кристаллов, что имеет важное практическое значение. Однако примененная в них традиционная схема распиливания не решает актуальную задачу, связанную с повышением интенсивности самого процесса распиливания кристаллов алмаза.

1.7.5. Применение вынужденных колебаний в процессе распиливания материалов

Одно из направлений существенного повышения производительности и качества механической обработки материалов связано с применением вынужденных колебаний, включая ультразвуковые [82–85]. Их введение в зону обработки позволяет снизить силы резания и деформирования, повысить производительность операции, стабилизировать динамические процессы, возникающие в технологической системе, и повысить качество обработанных поверхностей. На сегодня известно применение вынужденных колебаний практически на всех операциях обработки материалов резанием, однако при этом наименьшее внимание со стороны исследователей было уделено операции распиливания (разрезания) материалов лезвийным инструментом.

1.7.5.1. Применение ультразвуковых и низкочастотных колебаний в процессе разрезания материалов лезвийным инструментом

Известно применение ультразвуковых колебаний при распиливании металлов лезвийным инструментом [82-84].

На рисунке 1.32 приведена схема экспериментального устройства для распиливания металлических образцов ножовочным полотном при сообщении ему продольных ультразвуковых колебаний [84].

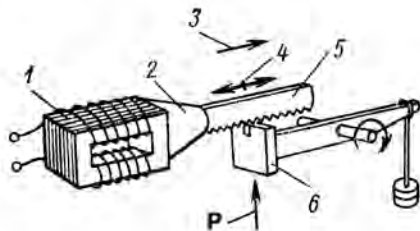


Рис. 1.32. Схема экспериментального устройства для распиливания металлических образцов ножовочным полотном с ультразвуком: 1 – магнестрикционный преобразователь; 2 – концентратор колебаний; 3 – направление резания; 4 – направление ультразвуковых колебаний; 5 – ножовочное полотно; 6 – обрабатываемый образец

Оно состоит из магнестрикционного преобразователя 1, концентратора колебаний 2, на выходном торце которого закреплено ножовочное полотно 5. Обрабатываемый образец 6 посредством рычажной системы прижимается с заданным усилием P к рабочей поверхности полотна, совершающего ультразвуковые колебания в направлении стрелки 4, стрелкой 3 на рисунке показано направление резания. Частота продольных колебаний полотна составляла 19,8 кГц при их амплитуде 5 мкм; скорость резания была постоянной и равнялась 0,17 м/мин; расстояние перемещения зубьев 25 мм. Усилие прижима образца к полотну изменялось от 8 до 50 Н. Испытания проводились на образцах из алюминия, углеродистой стали, дюралюминия и латуни. Разрезание образцов осуществлялось как в обычных условиях, так и при сообщении полотну продольных ультразвуковых колебаний.

В результате проведенных исследований установлено, что при разрезании с ультразвуком интенсивность распиливания по сравнению с обработкой в обычных условиях возросла при разрезании алюминия примерно в 3 раза, дюралюминия – в 1,7 раз, латуни – в 3 раза и углеродистой стали – в 9 раз. При этом отмечено, что при наложении ультразвуковых колебаний существенно улучшается выход стружки: она не задерживается в канавках полотна, что имеет место при разрезании в обычных условиях. Поэтому в процессе резания с ультразвуком геометрия режущей части полотна остается

такой же как пред началом обработки, т.е. острота режущих кромок сохраняется.

На основе полученных результатов исследований был разработан ножовочный станок (рисунок 1.33), при работе которого полотно совершает продольные колебания с частотой 20 кГц.

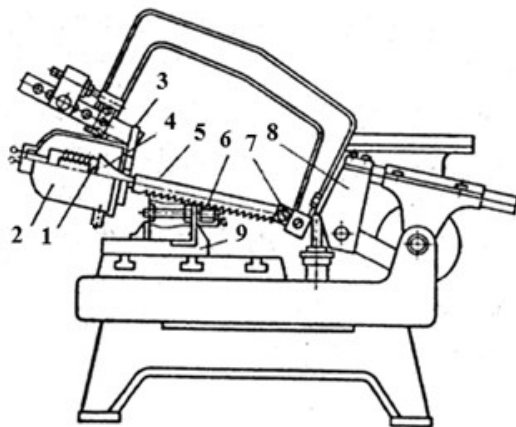


Рис. 1.33. Компоновка узлов ножовочного станка для разрезания заготовок с ультразвуком : 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – резервуар; 3 – опорная плита; 4 – концентратор колебаний; 5 – ножовочное полотно; 6 – обрабатываемая деталь; 7 – винт; 8 – опорная стойка; 9 – тиски

Источником колебаний является магнитострикционный преобразователь 1, к которому припаян концентратор колебаний 4. Ножовочное полотно 5 с помощью электросварки приварено к выходному торцу концентратора. Последний в его узловом сечении соединен электросваркой с опорной плитой 3, которая прикреплена к рамке ножовочной пилы. Другой конец полотна соединен с рамкой винтом 7. При выполнении этого соединения по обеим сторонам полотна установлены тонкие резиновые прокладки. Для охлаждения магнитострикционного преобразователя использовали резервуар 2. Опорная стойка 8 рамки пилы закреплялась таким образом, чтобы полотно пилы располагалось под соответствующим углом к обрабатываемой детали 6, которая закреплялась в тисках 9 ножовочного станка.

Разрезание проводили при следующих режимах: частота колебаний ножовочного полотка 19,7 кГц; максимальная амплитуда коле-

баний 7,5 мкм; средняя скорость резания 13,2 м/мин; длина рабочего хода 160 мм; нагрузка 10; 30 и 50 Н; обрабатываемые детали были изготовлены из алюминия, латуни и углеродистой стали. Разрезание детали осуществлялось в обычных условиях и с применением ультразвука.

При резке таких материалов целесообразно применять колебания, действующие перпендикулярно нормальной составляющей силы резания. На рисунке 1.34 показана компоновка ножовочного станка, в котором с помощью ультразвукового преобразователя продольных колебаний обеспечиваются изгибные колебания полотна.

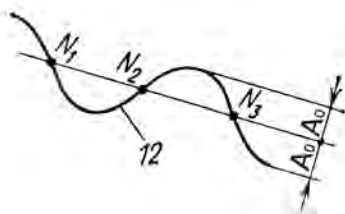
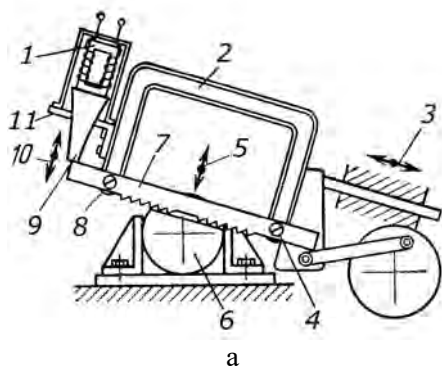


Рис. 1.34. Компоновка ножовочного станка с изгибными ультразвуковыми колебаниями полотна: а – компоновка станка; б – эпюра колебательных смещений полотна по его длине; 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – рамка; 3 – направление главного возвратно-поступательного движения; 4 – винт; 5 – направление изгибных колебаний полотна; 6 – обрабатываемая заготовка; 7 – ножовочное полотно; 8 – винт; 9 – концентратор колебаний; 10 – направление продольных ультразвуковых колебаний; 11 – опорная плита; 12 – изгибная волна

В этом случае один конец ножовочного полотна 7 жестко соединен с выходным торцом концентратора колебаний 9, который с помощью опорной плиты 11 установлен в вертикальной плоскости перпендикулярно направлению 3 главного возвратно-поступательного движения инструмента. От магнитострикционного преобразователя 1 через концентратор колебаний конец полотна получает продольные ультразвуковые колебания в направлении 10, которые преобразуются в изгибные колебания полотна, действующие в направлении 5. В узловых сечениях изгибной волны 12 (рисунк 1.33б точки N и N_3) с помощью винтов 8 и 4 полотно прикрепляется к рамке 2, с которой жестко связана опорная плита. Обрабатываемая заготовка 6 закрепляется в тисках ножовочного станка. В узловом сечении (точка N_2) изгибной волны, где амплитуда колебательных смещений равна нулю или имеет минимальное значение режущие зубья на полотне отсутствуют.

Испытания данного варианта ножовочного станка показали, что возбуждение в полотне изгибных колебаний позволяет в сравнении с разрезанием заготовок в обычных условиях повысить производительность операции и качество поверхности распила хрупких материалов, в частности, теллура.

Описанные выше технические решения применимы для станковых пил с ножовочными полотнами. В случае использования бесконечной ленточной пилы присоединить к ней вибратор невозможно, поэтому целесообразно сообщать колебания обрабатываемой заготовке с использованием низкочастотного вибратора. Схема станка с ленточной пилой, на котором колебания сообщаются заготовке приведена на рисунке 1.35.

На основании станка 7 на шариковых направляющих 5 смонтировано крепежное приспособление 4, в котором закреплена обрабатываемая заготовка 1. Сверху направляющие закрыты крышкой 12. В подшипниках 11 установлен эксцентриковый кулачок 9, которому от высокоскоростного электродвигателя 6 посредством ременной передачи 8 придается вращательное движение 10 вокруг вертикальной оси. Эксцентрик расположен в пазу крепежного приспособления, в результате чего последнее вместе с закрепленной в нем заготовкой получает колебательное движение 13 с частотой порядка 100 Гц.

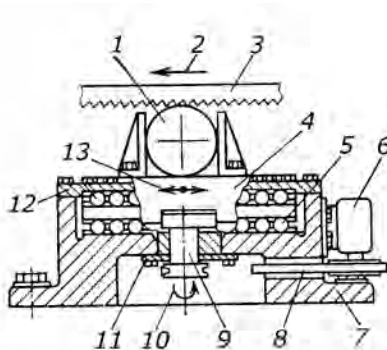


Рис. 1.35. Схема станка с ленточной пилой при сообщении колебаний обрабатываемой заготовке: 1 – заготовка; 2 – направление главного движения; 3 – ленточная пила; 4 – крепежное приспособление; 5 – шариковые направляющие; 6 – электродвигатель; 7 – станок; 8 – ременная передача; 9 – эксцентриковый кулачок; 10 – вращательное движение; 11 – подшипники; 12 – крышка; 13 – колебательное движение

Ленточная пила 3 прижимается к поверхности заготовки и совершает в процессе распиливания главное движение в направлении 2. Однако в этом случае для использования преимущества вибрационного резания необходимо, чтобы амплитуда колебательной скорости заготовки была больше скорости резания, чем ограничивается значение последней. Кроме этого, процесс обработки сопровождается действием в системе СПИД значительных инерционных нагрузок, вызывающих возникновение в ней дополнительных вибраций.

1.7.5.2. Применение ультразвуковой размерной обработки для распиливания хрупких неметаллических материалов

Для обработки заготовок из хрупких неметаллических материалов, в частности, кварца, керамики, ситаллов, рубина, германия, кремния т.д., которые нашли широкое применение в электронной и приборостроительной промышленности, эффективно используется ультразвуковая размерная обработка свободным абразивом [85].

Схема метода ультразвуковой размерной обработки приведена на рисунке 1.36.

Инструменту 3, который является частью акустической колебательной системы, сообщаются ультразвуковые колебания с частото-

той 18–44 кГц и амплитудой 10–60 мкм. Как правило, используются продольные колебания, но можно применять поперечные и крутильные. В состав колебательной системы входит магнитострикционный или пьезокерамический преобразователь 1 и стержневой концентратор 2 с коэффициентом усиления по амплитуде 5–20. Торцевой инструмент прижимается к поверхности обрабатываемой заготовки 4 с постоянной силой 20–200 Н при давлении прижима 10^5 – 10^6 Па.

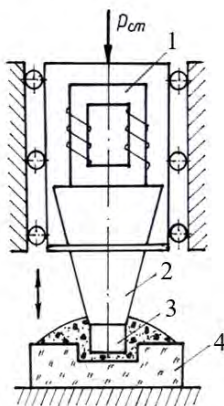


Рис. 1.36. Схема ультразвуковой размерной обработки: 1 – преобразователь; 2 – стержневой концентратор; 3 – инструмент; 4 – заготовка

В рабочую зону, т.е. в пространство между колеблющимся торцом инструмента и заготовкой, подается суспензия, состоящая из взвешенных в воде зерен абразива. Инструмент ударяет по зернам абразива и выкалывает частички материала обрабатываемой заготовки. Размер этих частиц небольшой, однако количество ударов велико, и при определенных условиях процесс протекает достаточно эффективно.

В основе ультразвуковой размерной обработки лежат два процесса:

- ударное внедрение абразивных зерен, приводящее к выкалыванию частиц обрабатываемого материала;

– циркуляция суспензии в рабочей зоне, за счет которой осуществляется вынос выколотых частиц и доставка свежих абразивных зерен.

Для обеспечения высокой производительности необходимо интенсивное протекание обоих процессов.

При ультразвуковой размерной обработке происходит хрупкое разрушение обрабатываемого материала и одновременно вязкое разрушение инструмента, выполненного из малоуглеродистой стали. В момент удара торца инструмента 2 по наиболее выступающим абразивным зернам 1 их вершины вдавливаются в поверхностные слои как детали, так и инструмента (рис. 1.37).

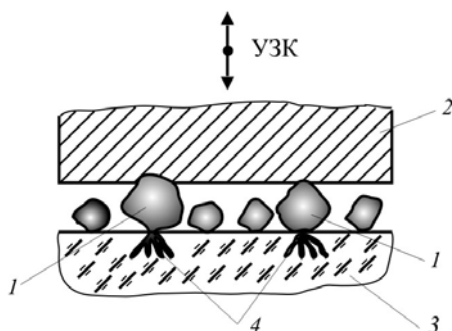


Рис. 1.37. Схема взаимодействия абразивных зерен с поверхностью заготовки и инструмента в процессе ультразвуковой размерной обработки: 1 – абразивные зерна; 2 – инструмент; 3 – обрабатываемый материал; 4 – микротрещины

Внедрение абразивных зерен в поверхность инструмента приводит только к упругопластическим деформациям, в то время как в поверхностном слое обрабатываемого материала 3 возникает сеть микротрещин 4, зарождающихся в наиболее слабых и перенапряженных местах.

Как известно, основным механизмом разрушения хрупких тел при всех методах абразивной обработки является распространение на некоторую глубину микро- и макротрещин, которые, пересекаясь между собой, формируют механически ослабленный слой (зона предразрушения), сравнительно легко разрушающийся при повторном воздействии абразивных зерен. Отделение частиц происходит в тот момент, когда максимальные касательные напряжения в зоне внедрения превысят сопротивления сдвигу. Вода, несущая абразив,

расширяет микротрещины и облегчает образование выколов, а также охлаждает инструмент и деталь.

При ультразвуковой размерной обработке можно говорить о главном и побочном резании. Главное резание осуществляется абразивными зернами, получающими энергию от рабочего торца инструмента. Побочное резание осуществляется зернами, находящимися между боковыми поверхностями заготовки и инструмента. Относительная доля побочного резания возрастает по мере углубления инструмента в деталь. С целью уменьшения побочного резания на инструментах применяют обратную конусность, внутреннюю подачу абразивной суспензии и т.д.

Для разрезания и раскроя заготовок из кварца, кремния, феррита и рубина могут применяться одиночный (рисунок 1.38а) и многоместный инструменты (рисунок 1.38б) [85].

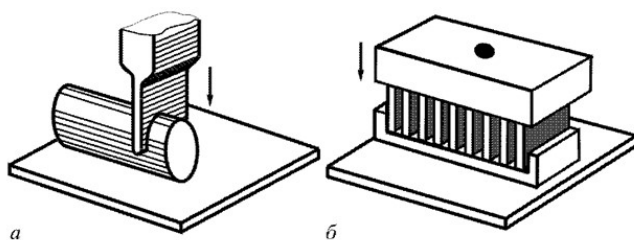


Рис. 1.38. Схемы ультразвукового разрезания заготовок:
а – одиночным инструментом; б – многоместным инструментом

Обработку одиночным инструментом применяют в опытном производстве, а также при значительных размерах заготовок (диаметр более 20 мм и толщина свыше 2 мм). В случаях отрезания пластин малой толщины (менее 0,5 мм) одиночным инструментом из-за поперечных колебаний тонкого инструмента заготовки часто ломаются.

Для устранения этого, а также с целью повышения производительности более эффективным является применение многоместного инструмента. Чтобы предотвратить сколы материала на выходе инструмента, заготовку перед обработкой приклеивают шилаком или мастикой к стеклянной подкладке. Для этого ее и заготовку предварительно разогревают, затем на поверхность подкладки ровным тонким слоем наносят мастику и сверху укладывают заготовку.

При изготовлении пластин-заготовок (4x12x45 мм) для пьезодатчиков брусок кварца разрезают многоместным инструментом. Во избежание сколов на выходе инструмента применяют следующую технологию (рисунок 1.39) [85].

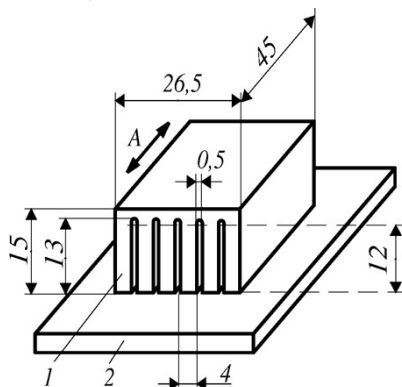


Рис. 1.39. Схемы изготовления пьезодатчиков из кварца:
1 – заготовка; 2 – стеклянная прокладка

Брусок разрезают на части шириной 13 мм (на 1 мм больше ширины обрабатываемой пластины). Затем брусок наклеивают на стеклянную прокладку 2 и алмазным кругом сошлифовывают перемычку, связывающую заготовку (шлифование осуществляется вдоль стрелки *A*). После расклеивания получают шесть пластин-заготовок 1.

Данная технология предотвращает сколы на краях деталей, т.е. обеспечивает высокое их качество, хотя при этом неизбежны потери материала на перемычки. Однако они окупаются разницей в толщине реза. Так, при алмазной резке толщина круга составляла 1,2 мм, а толщина лезвия ультразвукового инструмента – 0,4 мм.

Преимущества ультразвуковой резки перед резкой алмазными кругами возрастают с увеличением количества лезвий в инструменте. К примеру, резка бруска кварца сечением 16x16 мм на пластины толщиной 0,4 мм многоместным инструментом, включающим 20 лезвий, выполняется за 4 мин, т.е. на получение одной пластины затрачивается 12 секунд, в то время как на алмазную отрезку одной такой пластины требуется 1 минута.

Известен способ ультразвуковой обработки неэлектрических хрупких материалов движущимся непрофилированным инструментом – тонкой проволокой. Для возбуждения в подвижном инструменте ультразвуковых колебаний можно использовать три варианта акустических систем, схемы которых приведены на рисунке 1.40.

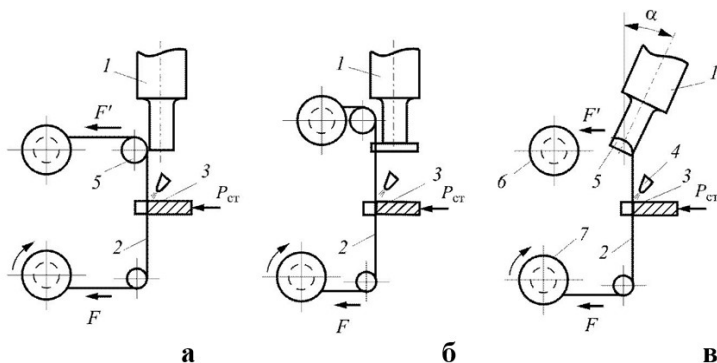


Рис. 1.40. Принципиальные схемы ультразвуковой размерной обработки непрофилированным инструментом: 1 – концентратор; 2 – инструмент-проволока; 3 – заготовка; 4 – абразивная суспензия; 5 – шип; 6, 7 – катушка

В первом случае (рисунок 1.40а) инструмент прижимается к боковой поверхности концентратора подпружиненным роликом 5, и за счет сил трения в проволоке 2 возбуждаются ультразвуковые колебания. В варианте на рисунке 1.40б инструмент-проволока 2 протягивается с небольшим натягом через фильеру, установленную в пучности колебаний концентратора. В последнем случае (рисунок 1.40в) инструмент огибает концентратор 1 по радиусной канавке, а прижим проволоки к концентратору осуществляется за счет ее противонатяжения.

Как показала практика, оптимальным является последний вариант, при котором обеспечивается стабильное протекание процесса при различных диаметрах инструмента. Обработка по этой схеме осуществляется следующим образом. В натянутой между двух опор проволоке, постоянно перематываемой с одной катушки 6 на другую катушку 7, возбуждаются ультразвуковые колебания от концентратора с помощью шипа 5. Обрабатываемую заготовку 3 с небольшим усилием прижимают к инструменту, а в зону их контакта

подается абразивная суспензия 4. Этот своеобразный «ультразвуковой лобзик» позволяет выполнять контурную вырезку, обработку узких пазов и щелей (шириной $\geq 0,1$ мм), разрезку заготовок и др. Производительность процесса резки стекла непрофилированным инструментом Q составляет 150–200 мм²/мин. Наиболее эффективен этот способ при обработке очень тонких деталей из стекла и керамики, когда другие способы вызывают разрушение детали. На производительность процесса и точность обработки основное влияние оказывают сила натяжения рабочего участка инструмента F и сила подачи $P_{ст}$ детали, свойства материала и толщина обрабатываемой детали, амплитуда и спектр колебаний инструмента-провода, материал и зернистость абразива.

Процесс обработки осуществляется под действием изгибных колебаний, возбуждаемых в проволочном инструменте. Работа изгибных колебаний зависит главным образом от амплитуды колебаний волновода A_0 и силы натяжения инструмента F .

Обобщая результаты проведенного анализа литературных данных по вопросу применяемых в настоящее время технологий и оборудования для распиливания хрупких неметаллических материалов, следует отметить следующие положения:

Рассмотрены применяемые в промышленности основные способы механического распиливания заготовок из хрупких неметаллических материалов, включая распиливание алмазным отрезным кругом с наружной и внутренней режущей кромкой, распиливание бесконечной лентой, штрипсами и проволокой. Проанализированы технологические показатели этих способов распиливания в отношении производительности, а также точности и качества распиленной поверхности штучной заготовки, которые в совокупности определяют процент выхода годной продукции. Показано, что наибольший уровень требований по обеспечению максимального процента выхода годного предъявляется при распиливании заготовок из дорогостоящего сырья, в частности кристаллов алмаза.

Показано, что все проводимые на сегодня работы по дальнейшему совершенствованию операции механического распиливания хрупких неметаллических материалов, включая кристаллы алмаза, сосредоточены на трех основных направлениях: повышение режущей способности и износостойкости применяемых инструментов; создание технологического оборудования, обеспечивающего авто-

матическое управление в процессе обработки усилием прижатия заготовки к режущей кромки инструмента; сообщение заготовке вынужденных колебаний, направленных перпендикулярно режущей кромке инструмента.

Однако на сегодня вопросы применения вынужденных колебаний в процессе механического распиливания хрупких неметаллических материалов изучены в недостаточной степени, что сдерживает их использование с целью повышения производительности выполнения этих операций и качества поверхности штучных заготовок (полуфабрикатов).

2. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

К одной из первых попыток использования ультразвуковых колебаний в процессе распиливания кристаллов алмаза следует отнести экспериментальные исследования приведенные в работе [86]. В одной серии экспериментов колебаний сообщались обрабатываемому кристаллу алмаза (рисунок 2.1а), а во второй – распиловочному диску (рисунок 2.1б).

В первом случае продольные ультразвуковые колебания от магнитострикционного преобразователя 1 через волновод 2 сообщались сменному инструменту 3, в котором жестко закреплялся обрабатываемый кристалл алмаза 4. Последний за счет статического нагружения всей акустической системы прижимался к режущей кромке распиловочного диска 5. Таким образом, в процессе распиливания кристалл алмаза совершал колебания с ультразвуковой частотой, направленные перпендикулярно кромке диска.

Для сообщения ультразвуковых колебаний распиловочному диску использовалась вращающаяся акустическая головка, выполняющая роль шпинделя распиловочной секции. Ультразвуковые колебания от магнитострикционного преобразователя 1 сообщались многоступенчатому концентратору 2, установленному в корпусе 3 на подшипниках качения. На выходном торце волновода закреплялся распиловочный диск 4, в котором возбуждались ультразвуковые колебания.

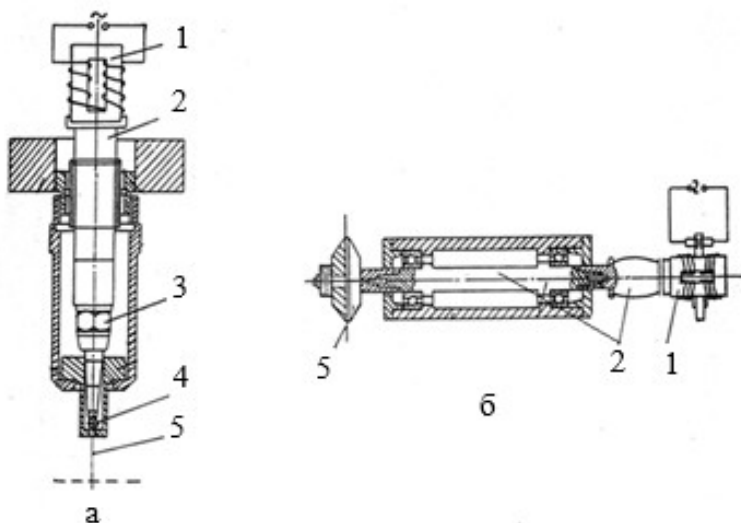


Рис. 2.1. Схемы акустических колебательных систем:
 а – для сообщения колебаний обрабатываемому кристаллу алмаза;
 б – для сообщения колебаний распиловочному диску; 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – волновод; 3 – сменный инструмент;
 4 – кристалл алмаза; 5 – распиловочный диск

В обоих случаях распиливание осуществлялось диском толщиной 0,08 мм при следующих режимах: скорость резания составляла 42,6 м/с; статическое усилие прижатия алмаза к диску изменялось от 0,5 до 3,0 Н; частота ультразвуковых колебаний составляла 64 кГц, а их мощность регулировалась от 20 до 250 Вт.

По результатам проведенных исследований установлено следующее. Ультразвуковые колебания оказались достаточно эффективны только в самом начале заглабления распиловочного диска в алмаз (до 1 мм), а при дальнейшем увеличении глубины пропила их положительное влияние на повышение интенсивности распиливания резко падало. Кроме того, с увеличением мощности ультразвука до 100 Вт распиловочный диск терял устойчивость и разрушался. Аналогичная ситуация имела место при усилии прижима алмаза к распиловочному диску свыше 2 Н. При выполнении операции с ультразвуком часто наблюдалось разрушение (подкол) алмаза по плоскости (111) перед окончанием распиливания.

Таким образом, эти исследования не выявили практически значимых аспектов положительного влияния ультразвука на протекание процесса механического распиливания кристаллов алмаза. В определенной степени это объясняется целым рядом недостатков как методического, так и технического плана, допущенных авторами в ходе проведения экспериментальных исследований. В частности, отсутствие анализа ожидаемых эффектов от применения ультразвука привело к неопределенности требований к акустическим и конструктивным параметрам использованных источников ультразвука.

2.1. Теоретические исследования влияния ультразвуковых колебаний на основные показатели процесса механического распиливания хрупких неметаллических материалов

В данной разделе, основываясь на анализе закономерностей контактного взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемым кристаллом алмаза в условиях ультразвукового воздействия, выполнен комплекс теоретических исследований, результаты которых позволяют производить количественную оценку степени влияния колебаний на основные показатели процесса механического распиливания кристаллов алмаза в зависимости от режимов обработки (статическая нагрузка и скорость резания) и акустических параметров (амплитуда и частота вводимых колебаний). В частности, на повышение интенсивности распиливания; на снижение сил сопротивления при распиливании; на качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов.

Для решения этих задач, в первую очередь, необходимо основываясь на результатах предшествующих исследований и с учетом специфических особенностей процесса механического распиливания кристаллов алмаза, определить ожидаемые от применения ультразвука эффекты. Такое прогнозирование позволит обоснованно и целенаправленно подойти к выбору параметров ультразвукового воздействия, при которых обеспечивается его максимальное положительное влияние на основные показатели исследуемого процесса.

2.1.1. Прогнозирование эффектов ультразвукового воздействия на процесс механического распиливания хрупких неметаллических материалов

Рассматриваемый в данной работе процесс в полной мере можно отнести к процессам обработки материалов резанием. Поэтому полностью оправдано для решения поставленной задачи использовать результаты предшествующих исследований по применению ультразвука в процессах обработки материалов резанием.

К настоящему времени накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал по вопросу использования ультразвука в процессах обработки материалов резанием как лезвийными, так и абразивно-алмазными инструментами [62, 87, 88].

Как следует из анализа этих работ, введение в зону резания ультразвуковых колебаний, может проявляться в следующих основных аспектах:

- в периодическом изменении величины и направления вектора действительной скорости резания V
- в изменении характера приложения нагрузки – зона стружкообразования и режущий инструмент вместо квазистатической испытывают знакопеременную динамическую нагрузку;
- в изменении контактных условий на рабочих поверхностях инструмента, приводящих к снижению сил резания и трения;
- в изменении условий формирования поверхностного слоя детали – улучшение качества поверхности;
- в повышении динамической устойчивости системы СПИД.

Исходя из этого, применительно к процессу механического распиливания кристаллов алмаза использование ультразвука должно быть направлено на реализацию следующих основных эффектов.

Во-первых, под действием колебаний необходимо интенсифицировать процесс разрушения алмаза в зоне обработки и тем самым повысить производительность распиливания. Это, как следует из данных предшествующих исследований, может быть достигнуто за счет обеспечения высокочастотной знакопеременной динамической нагрузки, действующей в зоне резания, то есть реализации механизма так называемого импульсного резания.

Во-вторых, вводимые в зону обработки ультразвуковые колебания должны обеспечивать снижение шероховатости поверхности

площадок распиленных кристаллов алмаза. Такое влияние ультразвука может быть реализовано за счет обеспечения дополнительных высокочастотных колебательных смещений боковых поверхностей распиловочного диска относительно поверхностей площадок распиленного кристалла алмаза. При этом согласно результатов предшествующих исследований, снижение шероховатости по сравнению с традиционной обработкой наблюдается в определенном диапазоне значений амплитуды колебаний, который зависит от конкретных условий выполнения технологической операции.

В-третьих, за счет изменения контактных условий на рабочих поверхностях инструмента при ультразвуковом воздействии обеспечить снижение сил резания и трения, действующих в процессе распиливания кристаллов алмаза. Это позволит снизить уровень силового взаимодействия инструмента с заготовкой и тем самым облегчить условия протекания процесса распиливания, а также понизить температуру в зоне обработки.

Таким образом, на основе проведенного обобщенного анализа и сделанного прогноза можно обоснованно утверждать, что применение ультразвука в процессе механического распиливания кристаллов алмаза должно быть направлено на комплексную реализацию отмеченных выше эффектов, позволяющих повысить производительность и качество выполнения этой технологической операции.

Вместе с тем, для обеспечения высокой эффективности воздействия ультразвука на выходные показатели процесса распиливания необходимо, с учетом специфических особенностей этой операции определить рациональные условия и режимы возбуждения ультразвуковых колебаний в зоне обработки и, в первую очередь, направление их введения.

2.1.2. Обоснование рационального направления и способа введения ультразвуковых колебаний в зону распиливания

Как известно, эффективность ультразвукового воздействия в процессах механической обработки материалов, а первую очередь, определяется направлением введения колебаний в зону резания. Основываясь на результатах предшествующих исследований [89–91], посвященных установлению закономерностей влияния ультразвуковых колебаний различного направления на процесс изнашива-

ния трущихся поверхностей, и, учитывая основные требования к операции распиливания кристаллов алмаза, можно утверждать, что наиболее эффективное воздействие ультразвука с точки зрения реализации указанных выше эффектов, будет в том случае, когда колебания направлены перпендикулярно торцевой (режущей) поверхности диска и вектору скорости резания.

Основанием для такого вывода послужили следующие обстоятельства.

Все многообразие известных схем введения ультразвуковых колебаний при обработке материалов резанием и давлением можно свести к трем принципиально отличным случаям:

1. Колебания направлены перпендикулярно поверхности контакта и вектору относительной скорости скольжения (схема А, рис. 2.2а).

2. Колебания направлены параллельно поверхности контакта и перпендикулярно вектору относительной скорости скольжения (схема Б, рис. 2.2б).

3. Колебания направлены параллельно как поверхности контакта, так и вектору относительной скорости скольжения (схема В, рис. 2.2в).

Каждая из схем введения колебаний имеет свои характерные особенности касающиеся изменения кинематики и динамики взаимодействия поверхностей, которые определяют эффективность воздействия ультразвука на выходные параметры процессов поверхностной обработки материалов. В частности, на степень снижения сил резания (трения) на повышение износа трущихся поверхностей и т. д.

С введением колебаний параллельно поверхности контакта (схемы Б и В) степень влияния ультразвука, главным образом, определяется так называемым скоростным коэффициентом K_v , который представляет собой отношение амплитуды колебательной скорости $V_{0ак} = \omega_{ак}A_0$ и скорости скольжения поверхностей V_0 ($K_v = \omega_{ак}A_{0ак} / V_0$). При этом по мере его уменьшения степень проявления ультразвукового воздействия снижается. В случае, когда $K_v < 1$ при введении колебаний по схеме В влияние ультразвука полностью исчезает, а для схемы Б эта ситуация наступает при $K_v \rightarrow 0$.

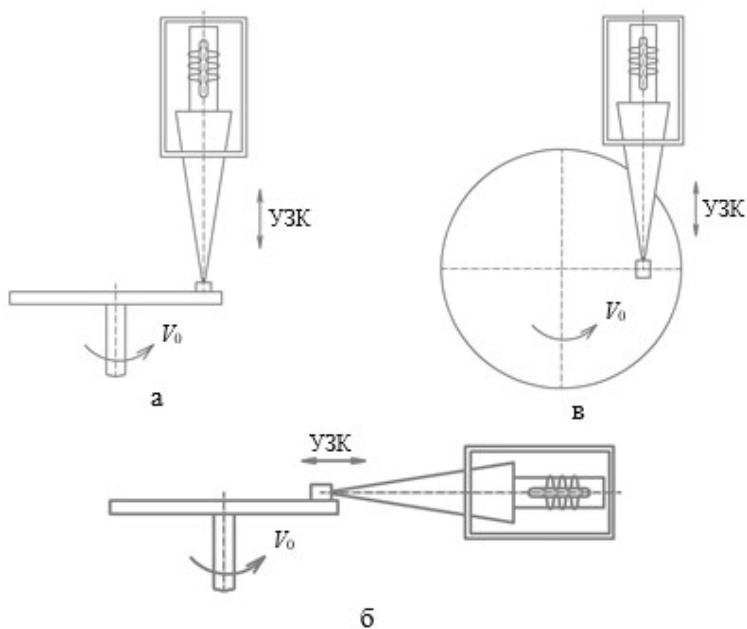


Рис. 2.2. Схема введения ультразвуковых колебаний (УЗК) в зону скользящего контакта: а – схема А – перпендикулярно поверхности контакта и вектору скорости скольжения V_0 ; б – схема Б – параллельно поверхности контакта и перпендикулярно вектору V_0 ; в – схема В – параллельно поверхности контакта и вектору V_0

Для интенсификации процесса распиливания за счет введения в зону обработки ультразвуковых колебаний необходимо обеспечить механизм импульсного резания, при котором реализуется высокочастотное динамическое взаимодействие инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки.

При введении колебаний по схеме В это условие обеспечивается только в том случае, когда амплитуда колебательной скорости $V_{0ак}$ превышает значение скорости резания в обычных условиях V_0 , то есть когда выполняется неравенство $V_{0ак} > V_0$. При этом, чем это неравенство больше, тем интенсивнее проявляется механизм импульсного резания, при котором за период колебаний T резание осуществляется только в течение некоторой его части t_p , определяемой соотношением $V_{0ак} / V_0$ при условии $V_{0ак} > V_0$. Таким образом,

рассматриваемое направление введения колебаний в зону обработки из-за отмеченных обстоятельств нельзя признать приемлемым для использования в процессе механического распиливания кристаллов алмаза. Для этого достаточно сравнить значение скорости резания с возможным значением амплитуды колебательной скорости вводимых в зону обработки ультразвуковых колебаний. В процессе механического распиливания кристаллов алмаза $V_0 = 35\text{--}45$ м/с. При использовании ультразвуковых преобразователей частотой 20–40 кГц, реально получить максимальные значения амплитуды колебательных смещений $A_0 = 20\text{--}30$ мкм, а, соответственно $V_{0\text{ак}} = 5\text{--}6$ м/с. Отсюда следует, что величина коэффициента K_v получается значительно меньше единицы, а поэтому заметное положительное влияние ультразвука на показатели процесса распиливания будет отсутствовать.

С введением ультразвуковых колебаний по схеме Б процесс обработки характеризуется изменением не только величины действительной скорости резания, как при схеме В, но и ее направления. При этом механизм импульсного (косоугольного) резания обеспечивается в несколько большем диапазоне значений коэффициента K_v . Тем не менее, при таком направлении введения колебаний существенное влияние ультразвука на показатели процесса резания обеспечивается при условии $K_v > 1$. Следовательно, введение в зону распиливания ультразвуковых колебаний по схеме Б также нельзя признать удовлетворительным. Кроме того, в пользу такого вывода свидетельствует и то обстоятельство, что при таком направлении введения колебаний в зону распиливания будет происходить увеличение (разбивка) толщины реза, что не приемлемо с точки зрения обеспечения минимальных потерь алмазного сырья при распиливании.

В случае введения колебаний в зону обработки по схеме А взаимодействие элементов может протекать в двух режимах: в виброударном, когда происходит дискретное взаимодействие контактирующих поверхностей, и в безотрывном при наличии скользящего акустического контакта. В последнем случае колебательная система является линейной, а эффективность ультразвукового воздействия очень мала.

В виброударном режиме колебательная система является нелинейной и чем выше интенсивность ее возбуждения, тем больше сте-

пень влияния ультразвука на параметры процесса обработки. Особо следует подчеркнуть, что в таком режиме ее работы скоростной коэффициент K_v в значительной степени меньше, чем для схем Б и В, влияет на эффективность ультразвукового воздействия, что принципиально важно для интенсификации процесса распиливания кристаллов алмаза. Это позволяет обеспечить импульсный механизм резания, мало зависящий от соотношения амплитуды колебательной скорости вводимых ультразвуковых колебаний и скорости резания.

Второй принципиальный момент, свидетельствующий в пользу рассматриваемой схемы введения колебаний, заключается в следующем. Условие реализации в акустической колебательной системе виброударного режима и его интенсивность, главным образом, определяются величиной ее статического нагружения ($P_{ст}$). Принимая во внимание, что при распиливании кристаллов алмаза величина статической нагрузки невелика и составляет 1,5–2 Н можно гарантировать обеспечение виброударного режима взаимодействия режущей кромки диска с поверхностью алмаза, что является первостепенным условием интенсифицирующего воздействия ультразвука на процесс механической обработки хрупких материалов.

К этому следует добавить еще одно важное обстоятельство, подтверждающее целесообразность введения колебаний в зону распиливания по схеме А. В этом случае обеспечиваются высокочастотные относительные колебательные смещения боковых поверхностей распиловочного диска и обрабатываемого кристалла, что должно способствовать повышению качества поверхности площадок распиленных заготовок (полуфабрикатов.) При этом для этих поверхностей реализуется введение колебаний по схеме Б, которая обеспечивает положительное влияние ультразвука в большом диапазоне значений коэффициента K_v .

Следующий важный этап связан с разработкой принципиальной схемы распиливания кристаллов алмаза с учетом обеспечения выбранного направления ультразвуковых колебаний в зону обработки. Рациональное решение этой задачи, в первую очередь, связано с определением активного элемента технологической системы, то есть элемента, посредством которого ультразвуковые колебания передаются в зону распиливания. При этом не менее важными являются вопросы простоты конструктивного исполнения с точки

зрения практической реализации способа распиливания кристаллов алмаза с ультразвуком.

С этих позиций совершенно очевидно, что ультразвуковые колебания следует сообщать обрабатываемой заготовке алмаза в направлении перпендикулярном торцевой поверхности распиловочного диска. На рис. 2.3 приведена предлагаемая схема распиливания кристаллов алмаза.

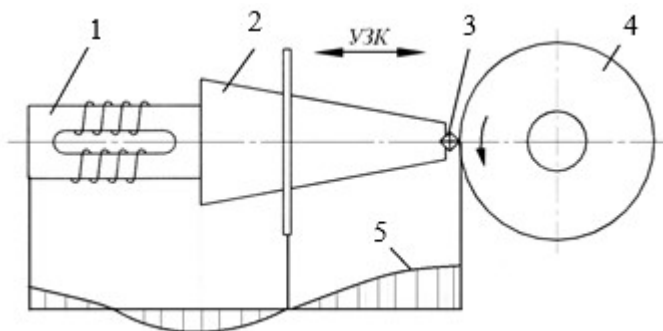


Рис. 2.3. Рациональная схема введения ультразвуковых колебаний в зону распиливания кристаллов алмаза: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – концентратор; 3 – обрабатываемый кристалл алмаза; 4 – распиловочный диск; 5 – эпюра колебательных смещений в акустической системе

Обрабатываемая заготовка 3 жестко закрепляется на выходном торце концентратора 2 ультразвукового преобразователя 1, образуя с ним резонансную акустическую систему. Корпус преобразователя вместе с обрабатываемой заготовкой прижимается к торцевой поверхности вращающегося распиловочного диска 4. Таким образом, в предложенном варианте, реализована практически традиционная схема распиливания кристаллов алмаза при этом обеспечено выбранное направление введения ультразвуковых колебаний в зону обработки.

С целью подтверждения сделанных выводов и установления эффективности влияния ультразвука на основные показатели процесса механического распиливания кристаллов алмаза был проведен комплекс теоретических исследований, включающий оценку влияния ультразвука на интенсивность (производительность) распиливания,

величину сил резания и трения, а также на качество распиленной поверхности кристалла алмаза.

В начале проанализируем характерные особенности взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой при сообщении ей ультразвуковых колебаний в принятом направлении, которые необходимо учесть при разработке математической модели процесса.

Как уже указывалось [19, 84, 92] взаимодействие торцевой (режущей) поверхности диска с обрабатываемым кристаллом может протекать в двух режимах: безударном, когда контактирующие поверхности колеблются как одно целое в пределах упругих контактных деформаций, и дискретном или виброударном, который сопровождается периодическим разрывом их механического контакта с последующим соударением взаимодействующих поверхностей. Условие перехода акустической колебательной системы из безударного в виброударный режим работы, согласно [19] имеет вид

$$A_0 > 2x_{ст}, \quad (2.1)$$

где A_0 - амплитуда ультразвуковых колебаний;

$x_{ст}$ - величина предварительного натяга в акустической колебательной системе, обусловленная ее статическим нагружением.

Учитывая, что существенное влияние на показатели процессов обработки материалов резанием, ультразвук оказывает именно в виброударном режиме работы акустической колебательной системы, примем, что в процессе распиливания с ультразвуком неравенство (1.1) выполняется. Таким образом, принципиальное отличие процесса распиливания в условиях ультразвукового воздействия по сравнению с традиционным заключается в том, что взаимодействие торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой происходит в виброударном режиме. То есть квазистатический характер взаимодействия инструмента с заготовкой, свойственный распиливанию в обычных условиях, сменяется динамическим высокочастотным ударным их взаимодействием. На рис. 2.4 качественно показан характер изменения нормальной составляющей силы резания при обычных условиях распиливания ($P_{уст}$) и при обработке с ультразвуком ($P_{уак}$). В первом случае значение $P_{уст}$ за время, соответ-

ствующее периоду колебаний, остается постоянным, а во втором сила $P_{\text{уак}}$ действует только часть периода колебаний, обусловленную временем контакта t_k торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой, а в оставшееся время $T - t_k$ ее значение равно нулю.

По данным [93] изменение нормального контактного давления за время ударного взаимодействия описывается куполообразной кривой, которую с небольшой погрешностью можно аппроксимировать синусоидой

$$P_{\text{уак}} = \frac{P_{0\text{уак}} \sin \pi t}{t_k}.$$

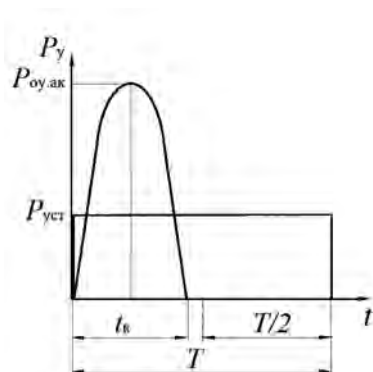


Рис. 2.4. Характер изменения нормальной составляющей P_y силы резания при обычных условиях и при ультразвуковом воздействии за период колебаний T

При этом с увеличением амплитуды колебаний, то есть интенсивности ультразвука, время контакта взаимодействующих поверхностей за период колебаний уменьшается, а значение максимально-го давления за время t_k возрастает.

Исходя из отмеченных особенностей контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой, выделим характерные стадии процесса распиливания с ультразвуком и оценим его влияние на изменение условий обработки, чтобы адекватно учесть их в ходе теоретических исследований.

На рис. 2.5, а показана схема распиливания при традиционных условиях обработки.

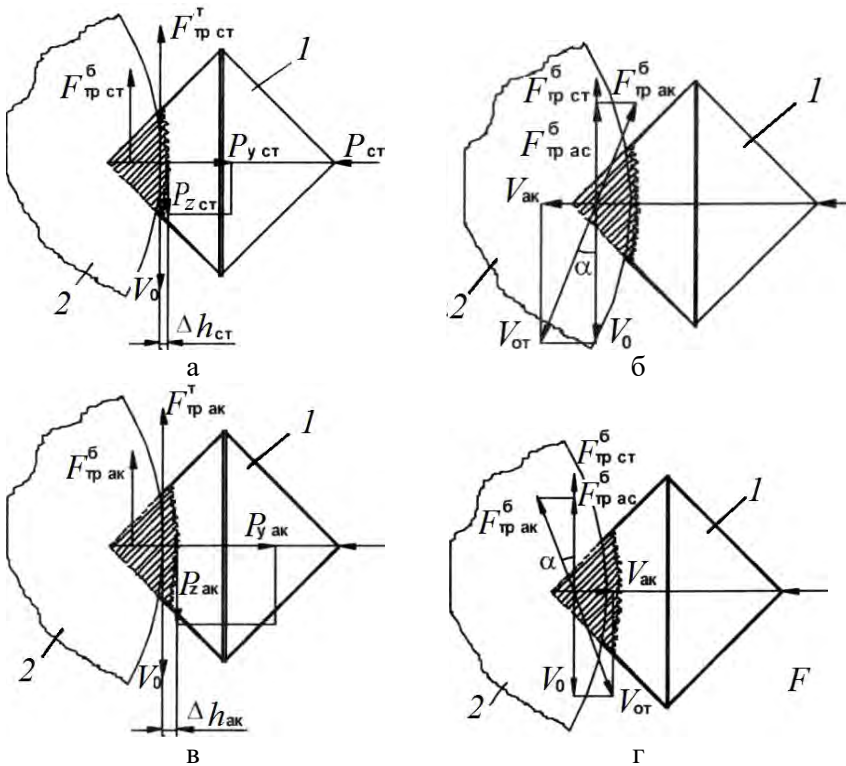


Рис. 2.5. Характерные стадии взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемым кристаллом алмаза: а – при обработке в обычных условиях; б, в, г – при распиливании с ультразвуком; 1 – кристалл алмаза; 2 – распиловочный диск

Кристалл алмаза 1 прижимается к вращающемуся распиловочному диску 2 посредством нагрузки $P_{ст}$. В зоне контакта его торцевой поверхности с обрабатываемой заготовкой действуют: нормальная составляющая силы резания $P_{уст}$, тангенциальная составляющая силы резания $P_{з ст}$, а также силы трения (сопротивления) $F_{тр ст}^T$, направленные противоположно вектору скорости резания V_0 . Под действием этих квазистатических сил происходит разрушение

поверхности алмаза и формирование на ней предразрушенного слоя глубиной $\Delta h_{ст}$. В зонах контакта боковых поверхностей диска с уже пропиленными участками заготовки (на рис. 2.5 они заштрихованы) действуют силы трения $F_{тр.ст.}^б$, под действием которых происходит взаимное изнашивание этих поверхностей.

На рис. 2.5, б показана стадия взаимодействия инструмента с заготовкой в условиях ультразвукового воздействия, когда обрабатываемый кристалл алмаза движется с колебательной скоростью $V_{ак}$ к торцевой поверхности распиловочного диска. При этом механический контакт этой поверхности инструмента с заготовкой отсутствует, а поэтому на этой стадии силы резания и трения в зоне распиливания равны нулю. В этом случае действуют только силы трения, возникающие между боковыми поверхностями диска с уже пропиленной поверхностью заготовки. При этом в силу изменения направления вектора относительной скорости резания $V_{от}$, за счет дополнительного действия скорости $V_{ак}$ происходит изменение направления действия силы трения $F_{тр.ак.}^б$ на угол α от ее направления, соответствующего обычным условиям распиливания $F_{тр.ст.}^б$. Это, как известно [84, 94], с одной стороны приводит к снижению составляющей силы трения $F_{тр.ас.}^б$ действующей в направлении вектора $F_{тр.ст.}^б$ а с другой – к приращению, по сравнению с традиционной обработкой, пути относительного скольжения поверхностей за фиксированное время распиливания.

На рис. 2.5, в показана стадия, соответствующая ударному взаимодействию торцевой поверхности диска с обрабатываемым кристаллом. Она характеризуется импульсным приложением нормальной составляющей силы резания $P_{уак}$ (рис. 2.4) и соответствующим изменением ее тангенциальной составляющей $P_{зак}$. Под действием этих динамических сил происходит разрушение поверхности алмаза с формированием на ней предразрушенного слоя глубиной $\Delta h_{ак}$, которая, очевидно, больше $\Delta h_{ст}$. В направлении противоположном вектору V_0 действует сила трения $F_{тр.ак.}^т$, возникающая по площадке контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемым алмазом. Приняв, что на этой стадии колебательная скорость $V_{ак}$ практически

равна нулю, то относительная скорость скольжения взаимодействующих поверхностей совпадает с вектором V_0 , а возникающие по площадкам контакта боковых поверхностей распиловочного диска силы трения $F_{\text{тр.ак}}^T$ действуют в направлении противоположном V_0 .

Наступление третьей стадии совпадает с моментом разрыва механического контакта торцевой поверхности диска с заготовкой и ее движением с колебательной скоростью $V_{\text{ак}}$, как показано на рис. 2.5, г. В принципе эта стадия взаимодействия аналогична первой (рис. 2.5, б) с той только разницей, что изменяется направление вектора относительной скорости $V_{\text{от}}$, а следовательно, и направление действия сил трения, действующих по боковым поверхностям диска с уже пропиленной поверхностью заготовки $F_{\text{тр.ак}}^6$. После этого наступает следующий период ультразвуковых колебаний с последовательным прохождением выше отмеченных стадий.

Таким образом, при распиливании с ультразвуком реализуется механизм импульсного резания, при котором разрушение алмаза происходит за счет высокочастотного ударного взаимодействия его поверхности с торцевой (режущей) поверхностью диска. Скольжение же боковых его поверхностей с уже пропиленной поверхностью заготовки протекает при наличии высокочастотных относительных колебательных смещений, действующих в направлении перпендикулярном вектору скорости скольжения v_0 и параллельно плоскости распиливания. Исходя из отмеченных особенностей контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой при распиливании с ультразвуком, произведем теоретическую оценку степени его влияния на интенсивность (производительность) обработки и величину сил сопротивления, действующих в процессе механического распиливания кристаллов алмаза.

2.1.3. Теоретическая оценка степени влияния ультразвука на повышение производительности операции механического распиливания кристаллов алмаза

Для теоретической оценки степени влияния ультразвука на производительность процесса механического распиливания кристалла

алмаза сравним значения интенсивности его распиливания в обычных условиях $Q_{ст}$ и при введении в зону обработки ультразвуковых колебаний $Q_{ак}$. Так как площадь распиливания кристалла алмаза в обоих случаях принимается одинаковой, то, в конечном итоге, задача сводится к вычислению времени его распиливания в обычных $t_{ст}$ и при ультразвуковом воздействии $t_{ак}$. Поэтому оправдано количественно оценивать степень влияния ультразвука на интенсивность распиливания коэффициентом эффективности T_Q , определяемого выражением

$$T_Q = ((t_{ст} - t_{ак}) / t_{ст}) \cdot 100\% \quad (2.2)$$

где $t_{ст}$ и $t_{ак}$ – время распиливания кристалла алмаза в обычных условиях и с ультразвуком в предположении, что $t_{ст} > t_{ак}$.

Для выполнения соответствующих вычислений обратимся к расчетной схеме процесса распиливания, приведенной на рис. 2.6.

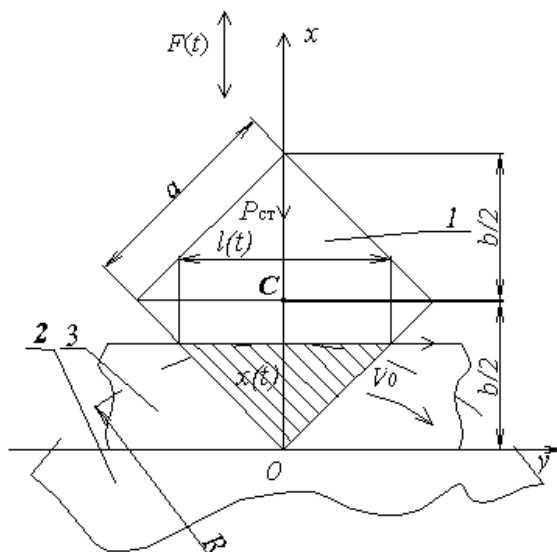


Рис. 2.6. Расчетная схема производительности процесса распиливания кристаллов алмаза: 1 – обрабатываемый кристалл алмаза, 2 – торцевая поверхность вращающегося распиловочного диска, 3 – прямолинейное полотно, имеющее скорость равную V_0

Обрабатываемый кристалл алмаза 1 за счет приложенной статической нагрузки $P_{ст}$ прижимается к торцевой поверхности вращающегося распиловочного диска 2 в результате чего осуществляется процесс распиливания в обычных условиях. Плоскость распиливания кристалла алмаза представляет собой квадрат со стороной a . Для удобства последующего анализа представим распиловочный диск радиуса R в виде прямоугольного полотна 3 ($R=\infty$) той же толщины, режущая кромка которого имеет ту же скорость, что и точка режущей кромки распиловочного диска. Последнее допустимо, поскольку размер контакта весьма мал в сравнении с R .

Свяжем систему координат x, y с образцом, как показано на рис. 2.6. Исходя из теории механического разрушения хрупких тел [95, 96], работу, затрачиваемую установкой на резание образца за время Δt , можно представить в виде

$$\Delta W_{ст} = aJ_{ст}V_0\Delta t, \quad (2.3)$$

где V_0 - скорость кромки диска (скорость резания); $J_{ст}$ - импульс, сообщаемый образцу вдоль оси x за единицу времени (среднее усилие взаимодействия), a - коэффициент, характеризующий долю работы сил резания, затрачиваемую на разрушение кристалла алмаза ($a < 1$).

Величина (2.3) должна совпадать с работой разрушения образца, равной

$$\Delta W_{раз} = \gamma_{ст} \cdot h \cdot l(t) \cdot \dot{x}(t) \cdot \Delta t \quad (2.4)$$

где $\gamma_{ст}$ - удельная (на единицу объема) работа разрушения-образования малых частиц материала образца;

h - ширина распила;

$l(t)$ - размер запила вдоль оси y , равный $l(t) = 2x(t)$ для выбранной формы кристалла, при $0 < x(t) < b/2$, где b - глубина пропила.

Из (2.3) и (2.4) следует дифференциальное уравнение

$$x(t) \cdot \dot{x}(t) = \frac{\alpha \cdot j_{\text{ст}} \cdot V_0}{2 \cdot \gamma_{\text{ст}} \cdot h}. \quad (2.5)$$

Считая величину $\gamma_{\text{ст}}$ постоянной и интегрируя (2.5) с начальным условием $x(0) = 0$, получим закон движения линии распила относительно кристалла алмаза

$$x(t) = \beta_{\text{ст}} \cdot \sqrt{t}; \quad \text{где } \beta_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot j_{\text{ст}} \cdot V_0}{\gamma_{\text{ст}} \cdot h}} \quad (2.6)$$

Зависимость (2.6) справедлива для интервала $0 \leq t \leq \tau$, где τ – время распиливания половины кристалла алмаза.

Оно определяется в виде

$$x(t) = \frac{b}{2} = \frac{a}{\sqrt{2}}; \quad \tau = \frac{a^2}{2 \cdot \beta_{\text{ст}}^2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{\omega}, \quad (2.7)$$

где N – количество оборотов диска за время распиливания;
 ω – его угловая скорость.

При $t > \tau$ в выражении (2.4) следует принять

$$l(t) = 2[b - x(t)], \quad (2.8)$$

откуда следует дифференциальное уравнение

$$[b - x(t)] \cdot \dot{x}(t) = \frac{\alpha \cdot j_{\text{ст}} \cdot V_0}{2 \cdot \gamma_{\text{ст}} \cdot h}, \quad \tau < t < \tau_{\text{ст}}. \quad (2.9)$$

Для начального условия $x(\tau) = b/2$ зависимость (2.9) запишется

$$x(t) = \frac{b}{2} \cdot \left[2 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \beta_{\text{ст}}^2}{b^2} \cdot (t - \tau)} \right], \quad \tau < t < \tau_{\text{ст}}. \quad (2.10)$$

Время полного распиливания кристалла алмаза $\tau_{\text{ст}}$ определяется условием $x(\tau) = b$, тогда из (2.7) находим

$$\tau_{\text{ст}} = \tau + \frac{b^2}{4 \cdot \beta_{\text{ст}}^2} = \tau + \frac{a^2}{2 \cdot \beta_{\text{ст}}^2} = \frac{a^2}{\beta_{\text{ст}}^2} = 2\tau. \quad (2.11)$$

Зависимость $x(t)$ согласно формулам (2.6) и (2.10) является антисимметричной (нечетной) относительно точки $t = \tau$, $x = b/2$.

Для вычисления работы, затрачиваемой на распиливание половины кристалла, следует просуммировать выражение (2.4)

$$\begin{aligned} W_{\text{раз}} &= \int_0^{\tau} \gamma_{\text{ст}} \cdot h \cdot l \cdot \dot{x}(t) dt = 2 \cdot \gamma_{\text{ст}} \cdot h \cdot \int_0^{\tau} x(t) \cdot \dot{x}(t) dt = \\ &= \gamma_{\text{ст}} \cdot h \cdot x^2(\tau) = \frac{\gamma_{\text{ст}} \cdot h \cdot a^2}{2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

При распиливании в обычных условиях, когда действует статическая нагрузка $P_{\text{ст}}$, величина импульса за единицу времени, равную периоду вынужденных вибрационных колебаний T , определяется

$$I_{\text{ст}} = \frac{J_{\text{ст}}}{T} = \frac{\omega_{\text{вр}}}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^T P_{\text{ст}} \cdot dt = P_{\text{ст}}; \quad \beta_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot P_{\text{ст}} \cdot V_0}{\gamma_{\text{ст}} \cdot h}}, \quad (2.13)$$

где $\omega_{\text{вр}}$ – круговая частота колебаний.

Тогда время распиливания кристалла алмаза в обычных условиях обработки согласно (2.11) будет равно

$$\tau_{\text{ст}} = \frac{a^2 \gamma_{\text{ст}} h}{\alpha P_{\text{ст}} V_0}. \quad (2.14)$$

Из последней формулы видно, что время механического распиливания кристалла алмаза при прочих равных условиях определяется значениями статической нагрузки $P_{\text{ст}}$ и скорости резания V_0 , с увеличением которых производительность распиливания повысит-

ся, то есть $\tau_{ст}$ уменьшится. Произведение в знаменателе $\alpha P_{ст} V_0$ представляет собой мощность установки, затрачиваемой на разрушение алмаза за время его распиливания $\tau_{ст}$.

Перейдем к определению времени распиливания кристалла алмаза в условиях ультразвукового воздействия, когда колебания ему сообщаются вдоль оси OX (рис. 2.6). При этом реализуется виброударный режим взаимодействия торцевой (режущей) кромки распиловочного диска с обрабатываемой поверхностью кристалла алмаза. В этом случае за время равное периоду ультразвуковых колебаний T механическое взаимодействие указанных элементов происходит только некоторую его часть t_k , а в оставшееся время $(T - t_k)$ оно отсутствует. Таким образом, разрушение алмаза торцевой поверхностью диска происходит в результате действия повторяющихся с частотой ультразвука импульсов сил, то есть имеет место режим импульсного резания. Поэтому для расчета времени распиливания кристалла при ультразвуковом воздействии, в первую очередь, необходимо определить величину импульса силы, действующего в зоне обработки за время периода колебаний.

Для решения этой задачи воспользуемся моделью, представленной на рис. 2.7. По аналогии с [97] полуволновой концентратор заменен жестким стержнем 1 такой же массы. Он с помощью фланца 2 установлен в шариковых (идеальных) направляющих, допускающих его перемещение вдоль оси X . На выходном торце стержня прикреплен упругий невесомый виброэлемент 3, с которым жестко связан обрабатываемый кристалл алмаза. Посредством статической нагрузки $P_{ст}$ вся система прижимается к торцевой поверхности жесткого распиловочного диска 5.

С учетом четности магнитострикционного (пьезоэлектрического) эффекта виброэлемент имеет характеристику

$$U = \frac{R}{c} + A_0(1 - \cos \omega_{ак} t), \quad (2.15)$$

где U – текущее значение смещения; R – усилие, растягивающее элемент; c – жесткость упругого элемента; A_0 – амплитуда смещения, $\omega_{ак}$ – круговая частота ультразвуковых колебаний.

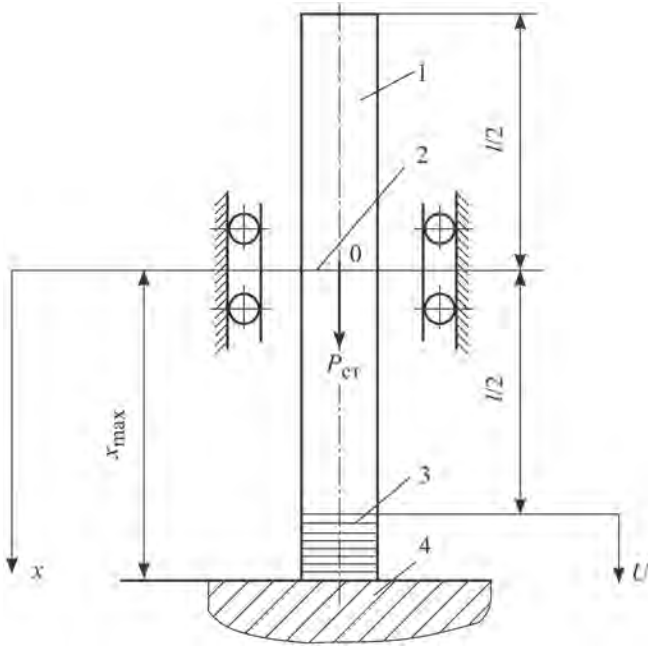


Рис. 2.7. Модель взаимодействия ультразвукового вибратора с жестким основанием: 1 – жесткий стержень; 2 – фланец; 3 – упругий невесомый элемент; 4 – основание

Обозначив $r = -R/c$, получим

$$U + r = A_0(1 - \cos \omega_{ак} t), \quad (2.16)$$

где $0 \leq U \leq 2A_0$; $0 \leq r \leq 2A_0$.

Исходя из этого, можно описать поведение системы в режиме виброударного взаимодействия заготовки с жестким распиловочным диском. Поведение системы в этом случае без учета диссипации энергии показано на рис. 2.8.

С целью упрощения математического описания авторы [97], заменив гармонический закон изменения $U(t)$ на закон треугольника (рис. 2.8, б) получили значение

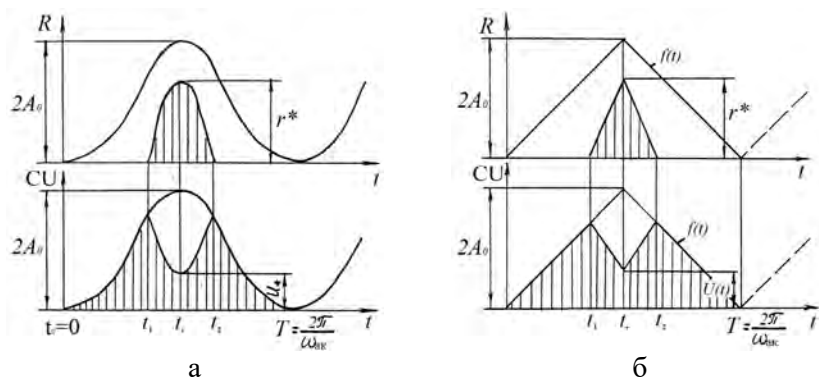


Рис. 2.8. Характер изменения R и CU : а – за период гармонических колебаний; б – при замене гармонического закона законом треугольника

$$J_{ак} = cr \cdot t_{к} \frac{8P_{ст}\pi}{A_0\omega_{ак}c} CD \quad (2.17)$$

величины импульса сил во время контакта взаимодействующих элементов

$$D = 1 + \frac{\beta}{N}, \quad C = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(\alpha + \beta)}}{2(1 + \alpha / \beta)}. \quad (2.18)$$

где D , C – безразмерные коэффициенты, которые могут принимать значения от единицы и выше.

Значения коэффициентов α и β определяются как

$$\alpha = \frac{mV_1^2c}{4P_{ст}}; \quad \beta = \frac{A_0m\omega_{ак}V_1c}{\pi P_{ст}}. \quad (2.19)$$

где V_1 – скорость движения преобразователя на момент контакта взаимодействующих элементов; m – масса стержня.

Коэффициенты C и D будут равны единице, если $V_1 = 0$, то есть в безотрывном режиме взаимодействия поверхностей, когда $A_0 < 2x_{ст}$,

где $x_{ст}$ – предварительный натяг упругого виброэлемента под действием статической нагрузки $P_{ст}$.

В безотрывном режиме взаимодействия акустическая колебательная система является линейной, при этом величина импульса силы за период колебаний соответствует статическому нагружению, а, следовательно, эффекты от ультразвукового воздействия будут равны нулю.

Если $A_0 > 2x_{ст}$, то взаимодействие контактирующих элементов протекает в виброударном режиме, а колебательная система становится нелинейной, что обусловлено нелинейным изменением коэффициентов C и D .

Таким образом, для определения времени распиливания кристалла алмаза с ультразвуком необходимо в выражения, полученные для обработки в обычных условиях внести следующие изменения. Во-первых, вместо $I_{ст}$ следует принять величину среднего за период колебаний T импульса силы взаимодействия торцевой поверхности распиловочного диска с поверхностью алмаза $I_{ак}$. Во-вторых, вместо значения удельной работы разрушения в обычных условиях $u_{ст}$ принять ее значение, соответствующее распиливанию с ультразвуком $u_{ак}$. При этом значения удельной работы разрушения $u_{ст}$ и $u_{ак}$ определяются для хрупких материалов величиной поверхностной энергии дисперсных частиц, а, следовательно, распределениями размеров этих частиц. Поэтому оправдано считать, что $u_{ст} > u_{ак}$ поскольку развитие трещин в случае ультразвукового воздействия в виброударном режиме облегчается.

С учетом этого, выражения (2.3) и (2.4) в условиях распиливания с ультразвуком примут вид

$$\Delta W_{ак} = aV_0 J_{ак} \Delta t, \quad (2.20)$$

$$\Delta W_{рез ак} = \gamma_{ак} hl(t)x'(t)\Delta t, \quad (2.21)$$

где $\Delta W_{ак}$, $\Delta W_{рез ак}$, соответственно, работа затрачиваемая установкой на резание образца в условиях ультразвукового воздействия.

Тогда дифференциальное уравнение (2.5) и его решение (2.6) примут вид

$$x(t) \cdot \dot{x}(t) = \frac{\lambda \cdot I_{\text{ак}} \cdot V_0}{2 \cdot \gamma_{\text{ак}} \cdot h}. \quad (2.22)$$

$$x(t) = \beta_{\text{ак}} \cdot \sqrt{t}; \text{ где } \beta_{\text{ак}} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot I_{\text{ак}} \cdot V_0}{\gamma_{\text{ак}} \cdot h}} \quad (2.23)$$

Тогда с учётом внесения соответствующих изменений в выражениях (2.9) и (2.10) время распиливания кристалла при ультразвуковом воздействии будет равно

$$\tau_{\text{ак}} = \frac{a^2 \gamma_{\text{ак}} h}{a I_{\text{ак}} V_0}. \quad (2.24)$$

Внося зависимости для определения $\tau_{\text{ст}}$ (2.14) и $\tau_{\text{ак}}$ (2.24) в (2.2) получим выражение для определения эффективности воздействия ультразвука на повышение интенсивности распиливания кристалла алмаза

$$\eta_Q = \left(1 - \frac{\tau_{\text{ак}}}{\tau_{\text{ст}}}\right) = \left(1 - \frac{P_{\text{ст}} \gamma_{\text{ак}}}{I_{\text{ак}} \gamma_{\text{ст}}}\right) = \left(1 - \frac{P_{\text{ст}} T \gamma_{\text{ак}}}{J_{\text{ак}} \gamma_{\text{ст}}}\right) \quad (2.25)$$

где $J_{\text{ак}}$ - импульс силы, сообщаемой кристаллу алмаза за время его контакта с распиловочным диском и определяемый выражением (2.17).

Из (2.25) следует, что степень интенсифицирующего воздействия ультразвука на производительность процесса распиливания кристалла алмаза определяется двумя соотношениями. Это отношение значений удельных работ разрушения поверхности алмаза при распиливании с ультразвуком и в обычных условиях ($\gamma_{\text{ак}} / \gamma_{\text{ст}}$), а также отношением импульса силы за период колебаний в обычных условиях распиливания ($P_{\text{ст}} T$) к импульсу силы при обработке с ультразвуком за время контакта поверхности алмаза с торцевой поверхностью диска $J_{\text{ак}}$.

Если принять, что $y_{ак} = y_{ст}$, то заниженная оценка степени влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания кристалла алмаза может быть произведена по выражению

$$\eta_Q = \left(1 - \frac{P_{ст} T}{J_{ак}} \right). \quad (2.26)$$

Подставляя в последнее выражение значение $J_{ак}$ из (2.17), получим

$$\eta_Q = \left(1 - \frac{A_0}{2x_{ак} CD} \right). \quad (2.27)$$

Последнее выражение позволяет производить количественную оценку степени влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания кристалла алмаза при виброударном режиме работы акустической колебательной системы, то есть, когда $A_0 > 2x_{ст}$. Если в процессе обработки реализуется безотрывный режим взаимодействия обрабатываемой поверхности кристалла с торцевой поверхностью диска ($A_0 < 2x_{ст}$), то коэффициент C и D равны единице, а, следовательно, $\eta_Q = 0$, то есть влияние ультразвуковых колебаний на интенсивность распиливания отсутствует.

В виброударном режиме работы акустической колебательной системы по мере увеличения неравенства $A_0 > 2x_{ст}$ значение η_Q возрастает, так как с повышением амплитуды ультразвуковых колебаний A_0 нелинейно возрастают значения безразмерных коэффициентов C и D . В (2.26) значение частоты вводимых в зону распиливания ультразвуковых колебаний в явном виде не входит, но оно учитывается при расчете коэффициентов C и D .

При неизменной амплитуде колебаний ($A_0 / 2x_{ст} = \text{const}$) с повышением их частоты влияние ультразвука на интенсивность распиливания возрастает, что обусловлено повышением величины значения $I_{ак}$.

На рис. 2.9 приведены графики изменения глубины пропила b от продолжительности распиливания кристалла алмаза в обычных

условиях и с ультразвуком, построенные по зависимостям (2.10 и 2.23). Из них видно, что под действием ультразвука скорость перемещения режущей кромки диска относительно заготовки возрастает, хотя характер зависимости $b(t)$ не изменяется, то есть обе являются антисимметричными (нечетными) относительно точки $b/2$. Таким образом, получены аналитические зависимости, позволяющие производить количественную оценку времени (интенсивности) распиливания кристалла алмаза, как в обычных условиях обработки, так и при ультразвуковом воздействии, учитывающие влияние технологических и акустических параметров. На их основе получено выражение, которое позволяет количественно оценить степень влияния ультразвуковых колебаний на повышение интенсивности распиливания кристаллов алмаза.

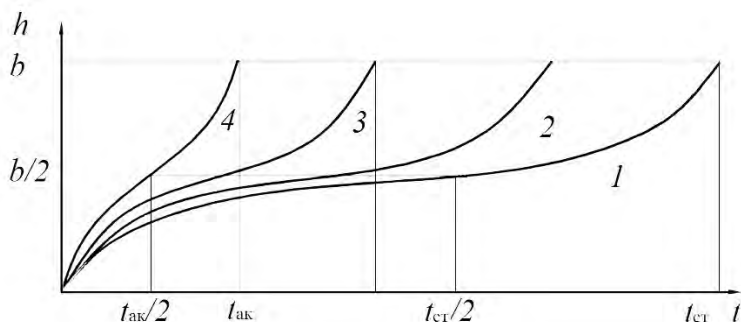


Рис. 2.9. Теоретические зависимости изменения глубины пропила от продолжительности обработки: 1 – без УЗК; 2 – с УЗК при $A_0 = x_{ст}$; 3 – с УЗК при $A_0 = 2x_{ст}$; 4 – с УЗК при $A_0 > 2x_{ст}$

Показано, что их влияние проявляется только при реализации виброударного режима взаимодействия торцевой поверхности распиловочного диска с обрабатываемым кристаллом алмаза, то есть когда имеет место неравенство $A_0 > 2x_{ст}$. Причем по мере увеличения этого неравенства степень влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания возрастает.

Указанный вывод справедлив и при наличии трения боковой поверхности распиловочного диска и поверхности алмаза. В этом слу-

чае следует добавить к работе разрушения (2.4) величину работы сил трения

$$\begin{aligned}\Delta W_{\text{тр}} &= 4\mu p x \Delta t, \quad (0 < x < b/2), \\ \Delta W_{\text{тр}} &= 4\mu p (b - x) \Delta t, \quad (b/2 < x < b),\end{aligned}$$

где μ - коэффициент трения боковой поверхности распиловочного диска и поверхности алмаза; p - среднее давление на боковой поверхности разреза, контактирующей с диском.

Уравнение (2.5) и закон движения (2.6) сохраняются, если полагать что

$$q_s = \sqrt{\frac{aV_0 J}{\gamma h + 2\mu p}}. \quad (2.28)$$

Аналогичные (2.14) и (2.24) значение времени распиливания кристалла алмаза запишутся

$$\tau_{\text{ст}} = \frac{a^2(\gamma_{\text{ст}} h + 2\mu_{\text{ст}} p)}{a_{\text{ст}} V_0}, \quad \tau_{\text{ак}} = \frac{a^2(\gamma_{\text{ак}} h + 2\mu_{\text{ак}} p)}{a_{\text{ак}} V_0}, \quad (2.29)$$

где $\mu_{\text{ст}}$ и $\mu_{\text{ак}}$ - соответственно значения коэффициента трения в обычных условиях распиливания и с ультразвуком.

Отсюда эффективность воздействия ультразвука с учетом сил трения при виброударном режиме работы акустической колебательной системы определяется

$$\eta_Q = \left(1 - \frac{\tau_{\text{ак}}}{\tau_{\text{ст}}}\right) = \left(1 - \frac{(\gamma_{\text{ак}} h + 2\mu_{\text{ак}} p) P_{\text{ст}} T}{(\gamma_{\text{ст}} h + 2\mu_{\text{ст}} p) J_{\text{ак}}}\right) \quad (2.30)$$

Поскольку $\mu_{\text{ст}} > \mu_{\text{ак}}$ в качестве приближенной оценки эффективности влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания кристаллов алмаза можно по-прежнему принять (2.27).

Более того, следует подчеркнуть, что при распиливании в условиях ультразвукового воздействия между силами трения, действующими на площадках контакта боковых поверхностей диска с алмазной заготовкой и вводимыми в эту зону колебаниями существует тесное взаимовлияние, рассмотрению которого посвящен следующий раздел данной главы.

2.1.4. Теоретическая оценка степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления в процессе распиливания

Величина сил сопротивления, возникающих в зоне контакта распиловочного диска с заготовкой (F_c), определяется, с одной стороны, силами резания и трения действующими между торцевой (режущей) поверхностью распиловочного диска ($F_{тр}^T$), а, с другой - силами трения, действующими по площадкам контакта боковых поверхностей распиловочного диска с пропиленной поверхностью заготовки ($F_{тр}^6$), т. е. $F_c = F_{тр}^T + F_{тр}^6$.

Причем от момента врезания (при распиливании «на ребро») по мере заглубления диска в заготовку значения составляющих $F_{тр}^T$ и $F_{тр}^6$ не остаются постоянными. Так, составляющая $F_{тр}^T$ с увеличением глубины распила до половины заготовки возрастает за счет повышения площади взаимодействия торцевой поверхности диска с заготовкой, а затем она снижается вплоть до окончательного ее разделения.

С учетом этого на рис. 2.10, качественно показан характер изменения тангенциальной составляющей $F_{тр}^T$ силы сопротивления по глубине распила за цикл обработки при различных значениях статической нагрузки.

Составляющая $F_{тр}^6$ силы сопротивления F_c представляет собой сумму сил трения, действующих в зонах контакта боковых поверхностей распиловочного диска с поверхностью пропиленной заготовки. По мере заглубления диска в материал заготовки поверхность ее контакта с боковыми поверхностями инструмента постоянно возрастает на протяжении всего времени обработки.

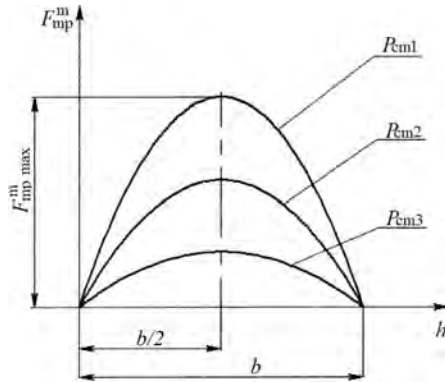


Рис. 2.10. Характер изменения силы сопротивления, действующей по торцевой поверхности диска за цикл распиливания при различных значениях статической нагрузки ($P_{ст1} > P_{ст2} > P_{ст3}$)

При этом от момента врезания до половины распила заготовки это возрастание происходит весьма интенсивно, что связано с повышением площадки контакта боковых поверхностей диска с заготовкой. Затем темп нарастания $F_{тр}^6$ замедляется, так как по мере дальнейшего распиливания приращение площади контакта происходит менее интенсивно.

Анализируя характер изменения $F_{тр}^6$ за цикл распиливания, следует отметить следующие обстоятельства. В отличие от металлообрабатывающего инструмента типа дисковых фрез, ножовочных полотен и пил, распиловочный диск не имеет на торцевой поверхности режущих зубьев с соответствующим их разводом. Поэтому при распиливании по мере его заглубления в материал заготовки ее пропиленные части за счет действия внутренних напряжений стремятся сомкнуться, в результате чего возрастает величина усилий действующих по нормали к боковым поверхностям диска. Данная ситуация иллюстрируется схемой (рис. 2.11) взаимодействия боковых поверхностей диска 1 с уже пропиленными участками заготовки 2 глубиной h . Под действием внутренних напряжений, высвобождающихся в материале заготовки при распиливании, возникают изгибающие моменты M_1 и M_2 , вызывающие упругие деформации пропиленных участков заготовки в направлении по нормали к боко-

вым поверхностям диска. Это приводит к действию со стороны пропиленных участков заготовки на боковые поверхности диска сил $F_{вн}$. Под действием этих по существу заклинивающих сил возрастает величина сил трения, действующих по площадкам контакта боковых поверхностей с пропиленной поверхностью заготовки $F_{вн1}$, которая по среднему сечению имеет вид треугольника с вершиной в точке K . Эта точка соответствует критической глубине пропила $h_{кр}$, при которой действие внутренних напряжений, а, соответственно, моментов M_1 и M_2 резко снижается или вовсе прекращается.

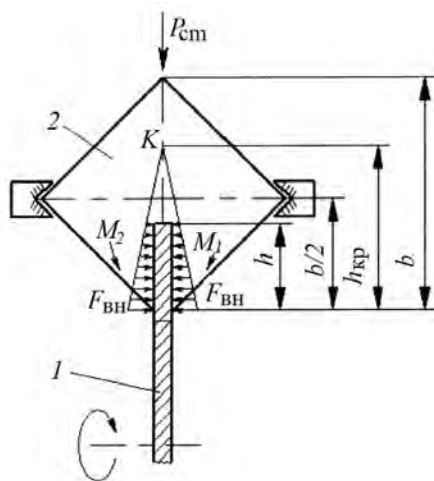


Рис. 2.11. Схема влияния внутренних напряжений на условия взаимодействия боковой поверхности распиловочного диска с пропиленными поверхностями заготовки

Величина $h_{кр}$ (точка K) находится в промежутке между половиной реза заготовки и полной длиной реза, т.е. $b/2 < h_{кр} < b$. С превышением глубины резания $h_{кр}$ значение величины сил трения, действующих по площадкам контакта, будет снижаться вплоть до окончательного разделения заготовки, достигая значения соответствующего условиям трения боковых поверхностей диска с поверхностями распиленных частей заготовки, закрепленных в державках станка.

На значение составляющей $F_{\text{тр}}^{\text{б}}$ сил сопротивления при распиливании оказывает также влияние характер износа боковой поверхности диска в процессе обработки. Дело в том, что по мере его заглубления в материал заготовки участки боковых поверхностей диска, расположенные ближе к зоне резания (к периферии диска) более длительное время и с большей окружной скоростью подвержены изнашиванию (истиранию), чем участки, расположенные на входе пропила. В результате такого неравномерного изнашивания боковых поверхностей распиловочного диска на нем в поперечном сечении по радиусу формируется конусность, как показано на рис. 2.12.

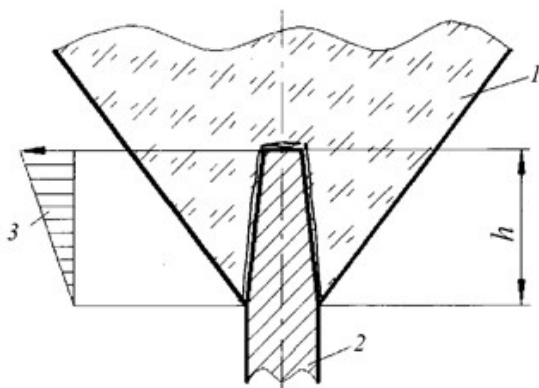


Рис. 2.12. Схема формирования конусности на диске в процессе распиливания: 1 – кристалл алмаза, 2 – распиловочный диск, 3 – эпюра линейного износа боковых поверхностей диска при распиливании кристалла на глубину h

Ее наличие также обуславливает возрастание сил трения (заклинивающих сил), действующих по боковым поверхностям распиловочного диска с поверхностями пропиленной заготовки. Влияние конусности боковой поверхности диска на величину составляющей $F_{\text{тр}}^{\text{б}}$ сил сопротивления значительно уменьшится с достижением критической глубины пропила ($h_{\text{кр}}$), когда действие внутренних напряжений станет весьма мало.

Основываясь на сделанных выше рассуждениях, можно представить качественную картину изменения составляющей $F_{\text{тр}}^{\text{б}}$ силы со-

противления в процессе распиливания заготовки в обычных условиях. От момента врезания (рис. 2.13, кривая 1) по мере увеличения глубины пропила h значение интенсивно возрастает, затем темп нарастания несколько снижается.

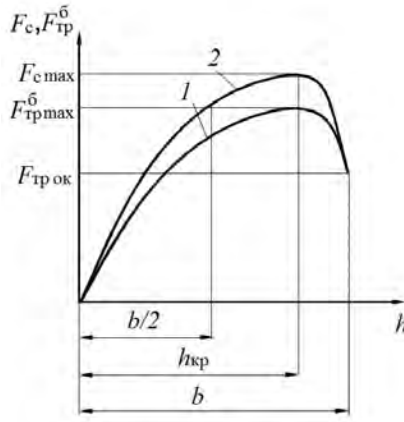


Рис. 2.13. Характер изменения сил трения (кривая 1) и сил сопротивления (кривая 2) по глубине пропила

Максимальное значение составляющей $F_{\text{тр.мах}}^{\text{б}}$ силы сопротивления имеет место при достижении диском критической глубины $h_{\text{кр}}$, после чего по мере увеличения h , ее значение начинает несколько снижаться вплоть до полного разделения заготовки. При этом в отличие от составляющей $F_{\text{тр}}^{\text{T}}$ силы сопротивления, значение которой при окончательном разделении заготовки равно нулю (рис. 2.11) рассматриваемая составляющая продолжает действовать, принимая значение $F_{\text{тр ок}}^{\text{б}}$, которое по существу определяет силу сопротивления распиливанию на этой стадии обработки, т.е. $F_{\text{тр ок}}^{\text{б}} = F_{\text{с}}$.

Учитывая, что составляющие $F_{\text{тр}}^{\text{T}}$ и $F_{\text{тр}}^{\text{б}}$ силы сопротивления при распиливании имеют различную природу и практически независимо

вливают на величину F_c , то для определения последней оправдано алгебраически суммировать значения этих составляющих

$$F_c = F_{\text{тр}}^T + F_{\text{тр}}^{\bar{6}}, \quad (2.31)$$

При этом априорно можно утверждать, что $F_{\text{тр}}^{\bar{6}} > F_{\text{тр}}^T$. Поэтому характер изменения силы сопротивления F_c за цикл распиливания будет определяться, главным образом, характером изменения составляющей $F_{\text{тр}}^{\bar{6}}$, т.е. силами сопротивления, действующими по площадкам контакта боковых поверхностей диска с поверхностями пропиленной заготовки. Исходя из этого, можно качественно представить характер изменения силы сопротивления F_c от глубины пропила h за цикл распиливания, путем графического сложения зависимостей $F_{\text{тр}}^T(h)$ и $F_{\text{тр}}^{\bar{6}}(h)$ (кривая 2 рис. 2.13). С учетом того, что $F_{\text{тр}}^T \ll F_{\text{тр}}^{\bar{6}}$ влияние составляющей $F_{\text{тр}}^T$ на характер изменения силы сопротивления F_c в процессе распиливания будет незначительным. Очевидно, оно будет проявляться в том, что по сравнению с $F_{\text{тр}}^{\bar{6}}(h)$ темп нарастания F_c на восходящей и снижения на падающей ветвях зависимости $F_c(h)$ будет несколько большим, достигая в момент разделения заготовки значения $F_{c \text{ ок}}$.

Такое отдельное рассмотрение физической природы и механизма влияния составляющих $F_{\text{тр}}^T$ и $F_{\text{тр}}^{\bar{6}}$ на силу сопротивления F_c в процессе распиливания также позволяет производить разделенную оценку степени влияния ультразвука на снижение этих составляющих при распиливании с колебаниями.

Вначале проанализируем ситуацию без учета влияния сил сопротивления (трения), действующих по площадкам контакта боковых поверхностей диска с пропиленной поверхностью заготовки, т.е. $F_{\text{тр}} = 0$.

Тогда можно считать, что значения статической нагрузки $P_{\text{ст}}$ и амплитуда A_0 ультразвуковых колебаний за время выполнения операции остаются неизменными ($P_{\text{ст}} = \text{const}$, $A_0 = \text{const}$). Эти допущения позволяют произвести количественную оценку степени влияния

ультразвуковых колебаний на снижение составляющей силы сопротивления $F_{\text{тр}}^{\text{T}}$ используя для этого результаты предшествующих исследований [98]. С этой целью воспользуемся коэффициентом эффективности, определяемым по выражению

$$\eta_{\text{F}}^{\text{T}} = \left(1 - \frac{F_{\text{тр.ак}}^{\text{T}}}{F_{\text{тр.ст}}^{\text{T}}} \right) \cdot 100\%. \quad (2.32)$$

Как отмечалось выше, взаимодействие торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой может протекать в двух режимах: безотрывном, когда указанные элементы колеблются как единое целое в пределах упругих деформаций (так называемый скользящий акустический контакт) и виброударном, при котором происходит периодический отрыв контактирующих поверхностей с последующим их соударением (так называемый дискретный акустический контакт). При этом существенное влияние ультразвука на показатели различных процессов механической обработки материалов проявляется именно в виброударном режиме работы акустической колебательной системы.

Таким образом, при распиливании с ультразвуком в виброударном режиме значение сил сопротивления $F_{\text{тр}}^{\text{T}}$ периодически изменяется от максимума в момент соударения торцевой поверхности диска с заготовкой до нуля при наличии зазора между ними. В результате средняя за период колебаний величина сил сопротивления $F_{\text{тр.ак}}^{\text{T}}$ будет меньше ее значения в обычных условиях распиливания $F_{\text{тр.ст}}^{\text{T}}$. С учетом соотношения между относительным сдвигом взаимодействующих поверхностей за время контакта $V_0 t_{\text{к}}$ и величиной предварительного смещения Δ [99–101] получены зависимости для определения степени снижения сил трения при введении ультразвуковых колебаний по схеме А (рис. 2.2а), которая при сделанных выше допущениях адекватно соответствует рассматриваемому случаю. Тогда при $V_0 t_{\text{к}} < \Delta$

$$\eta_F = \left(1 - \frac{V_0 t_k}{2\Delta}\right) \cdot 100\%, \quad (2.33)$$

а при $V_0 t_k > \Delta$

$$\eta_F = \left(1 - \frac{t_{\hat{\epsilon}}}{t_1}\right) \cdot 100\%, \quad (2.34)$$

где $t_1 = \Delta / V_0$ – время в течении которого происходит сдвиг, равный предварительному смещению.

Из (2.33) и (2.34) следует, что доминирующим фактором, определяющим степень снижения сил сопротивления за счет ультразвукового воздействия, является время контактного взаимодействия торцевой поверхности диска с обрабатываемым алмазом за период колебаний T (рис. 2.4).

В работе [19] получено выражение для вычисления времени контакта поверхностей t_k в условиях ультразвукового воздействия с введением колебаний по схеме А.

$$t_k = \frac{4P_{ст} \pi C}{A_0 \omega_{ак} c}, \quad (2.35)$$

где C – безразмерный коэффициент, значение которого определяется по (2.17) и (2.18);

c – жесткость упругого невесомого элемента.

Выражение (2.35) позволяет определить время контакта поверхностей t_k за период ультразвуковых колебаний $T = 2\pi\omega_{ак}$. При этом, если $A_0 = 2x_{ст}$, коэффициент C равен 1 и $t_k = T$, т.е. имеет место безотрывный режим взаимодействия поверхностей. В том случае, когда $A_0 > 2x_{ст}$, то взаимодействие поверхностей протекает в виброударном режиме, а система становится нелинейной, что обусловлено нелинейным изменением коэффициента C . Причем с увеличением неравенства $A_0 > 2x_{ст}$ за счет повышения амплитуды колебаний уровень виброударного режима работы системы возрастает. Это в свою очередь, приводит к сокращению времени контакта поверхностей t_k , а, соответственно, к повышению степени влияния

ультразвука на снижение сил сопротивления, действующих в зоне контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемым алмазом.

В общем случае, согласно [19], условие реализации виброударного режима в акустической колебательной системе при относительном скольжении поверхностей имеет вид

$$A_0 > 2(x_{ст} + x_v) \quad (2.36)$$

где $x_{ст} = P_{ст} / c$ – величина предварительного натяга, обусловленная статическим нагружением системы;

x_v – величина натяга, обусловленная подъемом («всплытием») подвижного звена акустической системы с увеличением скорости относительного скольжения поверхностей.

По своей физической сущности $x_{ст}$ и x_v определяют степень демпфирования колебаний в системе, т.е. уменьшение их амплитуды при неизменной интенсивности ее возбуждения. Следовательно, по мере увеличения $P_{ст}$ и V_0 неравенство (2.36) уменьшается, что приводит к возрастанию времени контакта поверхностей t_k и, как следствие, к понижению степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления, действующих в зоне распиливания.

Все выше приведенные рассуждения касались оценки влияния ультразвука на снижение сил сопротивления, действующих между торцевой поверхностью распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой, без учета сил трения, возникающих по его боковым поверхностям с уже пропиленной поверхностью алмаза. Такая оценка справедлива для условий скользящего контакта, когда уровень его силового и скоростного нагружения во времени остается постоянным.

Однако, как ранее отмечалось, в процессе распиливания по мере заглупления диска в материал заготовки это условие не соблюдается, так как наличие переменных по глубине пропила сил трения приводит к изменению режима работы акустической колебательной системы за счет изменения уровня ее силового нагружения, а, соответственно и степени ее демпфирования. Поэтому совершенно очевидно, что при неизменной интенсивности ультразвука по мере заглупления диска в материал заготовки в силу возрастания степени демпфирования в акустической системе, амплитуда колебательных

смещений будет снижаться, как показано на рис. 2.14, достигая своего минимального значения при глубине пропила, соответствующей $h_{кр}$, когда величина сил трения, а, следовательно, и степень демпфирования максимальны.

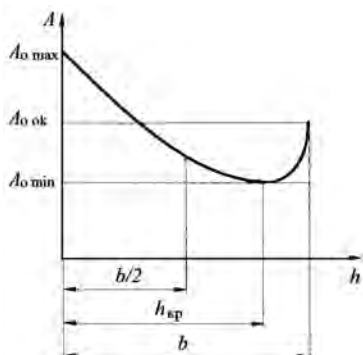


Рис. 2.14. Характер изменения амплитуды ультразвуковых колебаний по глубине распила

При $h > h_{кр}$ значение сил трения $F_{тр}^б$ уменьшается, что приводит к снижению степени демпфирования в акустической системе и возрастанию величины амплитуды колебательных смещений вплоть до окончательного разделения заготовки, достигая на этой стадии значения $A_{0 \text{ок}}$. Причем оно будет меньше начального значения амплитуды $A_{0 \max}$ в силу частичного демпфирования акустической системы силами трения, действующими по площадкам контакта боковых поверхностей диска с поверхностями уже пропиленной заготовки.

Из выше сказанного следует вывод о том, что степень влияния ультразвуковых колебаний постоянной интенсивности на снижение сил сопротивления $F_{тр}^б$ в процессе распиливания будет изменяться в такт изменению амплитуды колебательных смещений, действующих в зоне обработки, т.е. $\eta_F^{тр} f(h)$. В свою очередь, характер изменения амплитуды ультразвуковых колебаний по глубине распила определяется изменением степени их демпфирования, обусловленной действием переменных по величине сил трения, действующих в зоне обработки. Следовательно, для количественной оценки степе-

ни влияния ультразвука на составляющую сил сопротивления $F_{\text{тр}}^{\text{б}}$ необходимо установить закон изменения амплитуды ультразвуковых колебаний по глубине распила h .

В принципе эта ситуация аналогична известной в теории колебаний задаче [102, 103] о вынужденных колебаниях материальной точки при наличии сопротивления среды и, в частности, при наличии кулонова трения. В последнем случае сила сопротивления определяется силой трения $F_{\text{тр}}$, которая равна по величине произведению коэффициента трения на нормальную реакцию $F_{\text{Н}}$ направлена противоположно колебательной скорости

$$F_{\text{тр}} = -\mu F_{\text{Н}}. \quad (2.37)$$

Как указывалось выше, при распиливании сила сопротивления, оказывающая влияние на режим работы акустической колебательной системы, обусловлена, главным образом, силами трения, действующими по площадкам контакта боковых поверхностей диска с пропиленной поверхностью заготовки (F_6). При этом значение F_6 не остается постоянным, а изменяется за цикл распиливания, как показано на рис. 2.13. С учетом этого величину сил сопротивления, влияющих на параметры колебательного процесса при распиливании с ультразвуком, можно представить в виде

$$F_{\text{тр}}(h) = -2F_6(h) = -2\mu P(h). \quad (2.38)$$

При этом в интервале $0 < h < h_{\text{кр}}$ значение $F_{\text{тр}}(h)$ возрастает, а в интервале $h_{\text{кр}} < h < h_{\text{д}}$ оно снижается.

Теперь оценим степень влияния ультразвука на снижение сил трения, действующих на боковых сторонах распиловочного диска.

При сообщении обрабатываемой заготовке ультразвуковых колебаний в радиальном направлении по площадкам контакта боковых поверхностей распиловочного диска с пропиленной поверхностью заготовки действуют колебания, направленные параллельно этим площадкам и перпендикулярно вектору скорости резания V_0 (рис. 2.5 б, г). Наличие этих высокочастотных колебательных смещений приводит в сравнении с традиционной обработкой к измене-

нию кинематики относительного скольжения контактирующих поверхностей, вызывая тем самым снижение, действующих между ними сил трения.

Механизм этого снижения заключается в следующем. Под действием ультразвуковых колебаний происходит периодическое изменение величины и направления вектора действительной относительной скорости скольжения $V_{0к}$.

Его максимальное значение определяется

$$V_{0к} = \sqrt{V_0^2 + V_{0ак}^2},$$

где $V_{0ак} = \omega_{ак}A$ – амплитуда колебательной скорости, а угол его наклона на направление скорости скольжения (резания) в обычных условиях V_0 будет равен

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{V_0}{\sqrt{V_0^2 + V_{ак}^2}}, \\ \alpha &= \arccos \left(\frac{V_0}{V_{от}} \right). \end{aligned} \quad (2.39)$$

В результате изменения направления вектора скорости относительного скольжения поверхностей $V_{0к}$ происходит соответствующее изменение направления вектора силы трения $F_{тр}$. Если принять допущение о постоянстве силы трения, то ее проекция на направление действия вектора $V_{0к}$ будет меньше и определится как

$$F_{бак} = F_б \cos \alpha. \quad (2.40)$$

Следовательно, за счет ультразвукового воздействия значение силы трения, преодолеваемой приводом относительного скольжения поверхностей, оказывается меньшим в сравнении с обычными условиями их контактирования. Таким образом, при скольжении поверхностей с ультразвуком преодоление сил трения (сопротивления), возникающих в зоне контакта, происходит при совместном действии привода относительного перемещения поверхностей элек-

тродвигателя и колебательного привода (ультразвукового преобразователя). При этом вклад последнего в преодоление сил трения определяется соотношением мощности колебательного привода (интенсивности ультразвуковых колебаний) и силами трения, действующими в зоне скользящего контакта, и обусловленными уровнем его силового и скоростного нагружения.

В работе [91] получено выражение для количественной оценки степени влияния ультразвуковых колебаний рассматриваемого направления на снижение сил трения на скользящем контакте при постоянном уровне его силового нагружения.

$$\eta_{F_{\text{тр}}}^{\text{б}} = 1 - 0,63 \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{V_{0\text{ак}}}{V_0} + 1\right)} E_1\left(\frac{\pi}{2}, k\right)} \right), \quad (2.41)$$

где E_1 эллиптический интеграл первого рода

$$E_1\left(\frac{\pi}{2}, k\right) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}, \quad k^2 = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\left(\frac{V_0}{V_{0\text{ак}}}\right)}\right)^2}. \quad (2.42)$$

Из анализа выражений (2.41 и 2.42) видно, что степень снижения сил трения за счет ультразвукового воздействия определяется значением скоростного коэффициента $k_v = \frac{V_{0\text{ак}}}{V_0}$, который представляет собой отношение амплитуды колебательной скорости к скорости скольжения в обычных условиях. При этом, чем больше значение k_v , тем выше степень снижения сил трения под действием ультразвука и только при $\frac{V_{0\text{ак}}}{V_0} > 0$ параметр $\eta_{F_{\text{тр}}}^{\text{б}} > 0$.

Однако такая оценка справедлива для условий скользящего контакта, когда уровень его силового и скоростного нагружения во времени остается постоянным. Вместе с тем, как было показано выше, при неизменной интенсивности ультразвука по мере заглабления диска в материал заготовки происходит изменение амплитуды колебаний в акустической системе, а, следовательно, и амплитуды колебательных смещений, действующих по боковым поверхностям диска с уже пропиленной поверхностью заготовки. В результате значение амплитуды колебательной скорости $V_{0ак}$, входящее в выражения (2.41) и (2.42), также будет изменяться в соответствии с изменением A_0 (рис. 2.14), что, со своей стороны, обуславливает переменное значение скоростного коэффициента k_v , определяющего в конечном итоге степень снижения сил трения за счет ультразвукового воздействия. Исходя из этого, с целью количественной оценки влияния ультразвука неизменной интенсивности на снижение сил трения $F_6^{тр}$ по глубине распила вместо постоянного значения $V_{0ак}$ в выражениях (2.41) и (2.42) следует принимать амплитуду колебательной скорости, соответствующую фактическому значению амплитуды колебательных смещений, действующих в зоне обработки.

Помимо этого, следует учитывать еще одно обстоятельство, касающееся влияния ультразвука на снижение сил трения $F_6^{тр}$ в процессе распиливания. Оно связано с тем, что значение скорости относительного скольжения по площадкам контакта боковой поверхности распиловочного диска с пропиленными участками заготовки не остается постоянным. Так по мере заглабления диска в обрабатываемый кристалл скорость относительного скольжения по глубине пропила возрастает. Значение скорости относительного скольжения на участках, расположенных в зоне распила определится $V_0 = \omega R_d$, где ω – частота вращения распиловочного диска, R_d – его радиус. А на участках, соответствующих началу распиливания, ее значение будет равно $V_h = \omega(R_d - h)$, где h – глубина распила. При этом максимальная разность в скоростях относительного

скольжения ΔV_{\max} будет при $h = b$, где b – размер диагонали площадки распиливаемого кристалла алмаза, т.е. $\Delta V_{\max} = \omega b$.

Принимая во внимание, что $b \ll \lambda / 4$, где λ – длина ультразвуковой волны в колебательной системе, можно принять амплитуду колебаний по длине обрабатываемого кристалла постоянной. Тогда значения скоростного коэффициента, определяющего степень снижения сил трения под действием ультразвука, оказываются различными по длине площадки контакта боковых поверхностей распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой. Так на периферии диска, т.е. в зоне распиливания, его значение равно

$$k_{v0} = \frac{\omega_{\text{ак}} A_0}{\omega R_0},$$

а на участках, соответствующих началу распиливания

$$k_{vh} = \frac{\omega_{\text{ак}} A_0}{\omega (R_d - h)}.$$

При этом всегда сохраняется неравенство $k_{vh} > k_{v0}$, а потому степень влияния ультразвука на снижение сил трения оказывается больше на участках, соответствующих началу распиливания, в сравнении с участками, расположенными на периферии распиловочного диска.

Учитывая, для реальных условий распиливания $b \ll R_d$, оценку эффективности воздействия ультразвука на снижение сил трения $F_{\text{тр}}^{\delta}$, необходимо производить с учетом среднего значения скоростного коэффициента, определяемого по формуле

$$k_{v\text{cp}} = \frac{\omega_{\text{ак}} A_0(h)}{\omega \left(R_d - \frac{h}{2} \right)}. \quad (2.43)$$

Подставляя (2.43) в зависимости (2.41) и (2.42), получим выражение для усредненной количественной оценки степени влияния

ультразвука на снижение сил трения, действующих по площадкам контакта боковых поверхностей диска с обрабатываемой заготовкой в процессе ее распиливания, что вполне приемлемо для инженерных расчетов.

$$\eta_{F_{\text{тр}}}^{\text{б}} = 1 - 0,63 \left(\frac{1}{\sqrt{(k_{\text{Vcp}}^2 + 1)} E_1 \left(\frac{\pi}{2}, k \right)} \right). \quad (2.44)$$

Таким образом, на основе установленных особенностей процесса распиливания кристаллов алмаза, можно констатировать, что степень влияния ультразвуковых колебаний на снижение сил трения, действующих по площадкам контакта диска с обрабатываемой заготовкой, определяется значением скоростного коэффициента k_{Vcp} . При этом его величина при неизменной интенсивности ультразвука и скорости резания изменяется по глубине распила, что обусловлено изменением степени демпфирования колебаний в акустической системе. С учетом этого, получены аналитические выражения, позволяющие производить количественную оценку степени влияния ультразвука на снижение сил трения в процессе механического распиливания кристаллов алмаза в зависимости от технологических и акустических режимов обработки. Показано, что при неизменной интенсивности ультразвука максимальная степень его влияния на снижение сил сопротивления имеет место в начале распиливания (стадия врезания), а по мере увеличения глубины пропила ее значение снижается, достигая минимальной величины при критической глубине распила, после чего вплоть до окончательного разделения кристалла ее значение несколько возрастает.

2.1.5. Влияние ультразвуковых колебаний на условия формирования шероховатости распиленной поверхности кристалла алмаза

Одним из основных показателей процесса механического распиливания кристаллов алмаза является качество поверхности распи-

ленных полуфабрикатов, которое определяет потери алмазного сырья при их последующей подшлифовке. В этой связи чрезвычайно важно, чтобы наряду с интенсифицирующим воздействием, ультразвуковые колебания, по крайней мере, не вызывали ухудшения качества распиленной поверхности и, в первую очередь, ее шероховатость. Поэтому цель данного раздела заключается в проведении качественного анализа по оценке влияния ультразвуковых колебаний на условия формирования шероховатости распиленной поверхности кристалла алмаза.

В начале рассмотрим механизм формирования шероховатости пропиленной поверхности для условий традиционной обработки. При этом заметим, что окончательная роль в формировании шероховатости пропиленной поверхности принадлежит процессам ее взаимодействия с боковой поверхностью распиловочного диска и, в частности, процессам трения и изнашивания. Исходя из этого, механизм формирования шероховатости пропиленной поверхности можно представить следующим образом. За счет механического взаимодействия торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска с заготовкой в контактных зонах, прилегающих к его кромкам, происходит скалывание частиц алмаза, в результате чего на его пропиленной поверхности возникают микронеровности, формирующие назовем ее первоначальную шероховатость, а также образуется предразрушенный (ослабленный) слой.

По мере заглубления диска в заготовку эти участки пропиленной заготовки вступают в контакт с его боковыми поверхностями и подвергаются изнашиванию в результате трения скольжения взаимодействующих поверхностей. Это сопровождается изменением первоначальной шероховатости поверхностей пропиленных участков заготовки на протяжении всего времени выполнения операции. При этом характер изменения шероховатости, т.е. ее увеличение или уменьшение, будет определяться: доминирующим видом изнашивания трущихся поверхностей, условиями трения (давление на площадках контакта и скорость скольжения) и продолжительностью их взаимодействия, что равносильно пути относительного скольжения контактирующих поверхностей. Отсюда очевидно, что при прочих равных условиях, путь относительного скольжения участков контактирующих поверхностей по глубине пропила не остается постоянным. Это наглядно иллюстрируется схемой, приве-

денной на рис. 2,15 а, где показаны три характерных положения режущей кромки диска в процессе распиливания кристалла алмаза:

I—I – в начале распиливания;

II—II – при распиливании до половины;

III—III – при окончании распиливания.

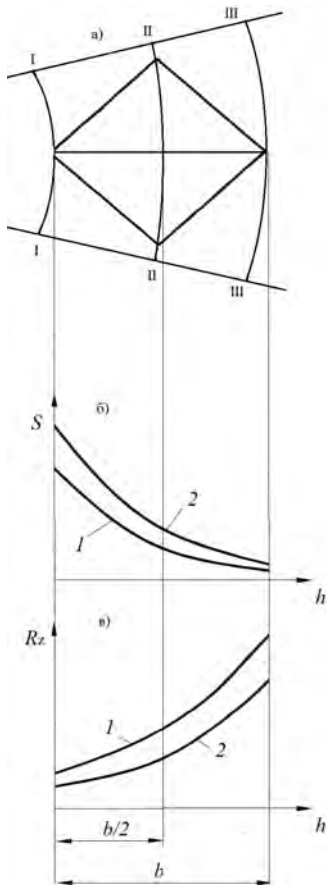


Рис. 2.15. Схемы, поясняющие механизм формирования шероховатости поверхности при распиливании: а – характерные положения режущей кромки диска в процессе распиливания кристалла алмаза; б – характер зависимости пути относительного скольжения поверхностей от глубины распила; в – характер зависимости высоты неровностей поверхности распиленной площадки по глубине распила; 1 – в обычных условиях обработки, 2 – при распиливании с ультразвуком

Соответственно этому на рис. 2.15б показан характер изменения пути относительного скольжения поверхностей по глубине распила h в предположении постоянства скорости распиливания.

Таким образом, участки пропиленной боковой поверхности кристалла, находящейся на входе распиловочного диска, подвержены максимальному по длительности трению – изнашиванию, а участки, расположенные на выходе распиловочного диска – минимальному. Поэтому оправдано ожидать, что и значение шероховатости поверхности площадки распиленного кристалла не будет постоянным по глубине пропила. Если принять, что доминирующим видом износа в процессе трения алмаза о боковую поверхность диска является адгезионный [14, 44, 104], то можно утверждать, что по мере увеличения продолжительности их относительного скольжения шероховатость поверхности будет уменьшаться за счет проявления полирующего эффекта, свойственного этому виду изнашивания [34]. Исходя из этого, на рис. 2.15в (кривая 1) качественно показан характер изменения высоты микронеровностей поверхности R_z распиленного кристалла по глубине пропила h . Участки поверхности, находящейся в начале распила, в силу максимальной продолжительности их изнашивания будут иметь минимальное значение высоты микронеровностей, которое по мере увеличения глубины распила будет возрастать. На стадии разделения кристалла, когда интенсивность (скорость) распиливания несколько возрастает, продолжительность трения-изнашивания будет минимальной, а, соответственно, высота микронеровностей на этом участке распиленного кристалла будет максимальной.

Таким образом, из выше приведенных рассуждений следует вывод о том, что при традиционных условиях распиливания кристаллов алмаза высота микронеровностей, формируемых на его пропиленной поверхности оказывается переменной, по глубине распила, что обусловлено изменением степени проявления полирующего эффекта, связано с адгезионным изнашиванием алмаза о боковые поверхности распиловочного диска. В результате минимальное значение высоты микронеровностей поверхности распиленного кристалла имеет место на участках врезания диска, а по мере его заглабления в заготовку оно возрастает, достигая максимального значения на участках поверхности, соответствующих разделению алмаза.

Теперь проанализируем влияние ультразвуковых колебаний на условия формирования шероховатости распиленной поверхности кристалла алмаза. Для этого отметим особенности протекания процесса, влияющие на условия формирования микронеровностей распиленной поверхности алмаза.

Во-первых, взаимодействие торцевой (режущей) поверхности диска с заготовкой протекают в высокочастотном виброударном режиме, что обуславливает скалывание частиц алмаза меньших размеров по сравнению со статическим нагружением. Следовательно, величина микронеровностей поверхности пропиленной заготовки на участках, прилегающих к кромкам диска, будет меньше в сравнении с распиливанием в обычных условиях.

Во-вторых, процесс трения скольжения пропиленной поверхности алмаза с боковыми поверхностями диска протекает при наличии высокочастотных колебательных относительных микросмещений, действующих в направлении параллельном поверхности их контакта и перпендикулярно вектору скорости резания. Это, как известно, интенсифицирует процесс изнашивания трущихся поверхностей. Поэтому, если принять, что в условиях ультразвукового воздействия также реализуется, главным образом, адгезионное изнашивание, то под действием колебаний проявление полирующего эффекта будет более значительно, что в свою очередь должно способствовать снижению шероховатости распиленной поверхности алмаза по сравнению с обработкой в обычных условиях.

При этом следует подчеркнуть, что приращение пути относительного скольжения поверхностей η_1 за счет ультразвукового воздействия можно рассчитать по зависимости [19]

$$\eta_1 = 1 - 1,57 \frac{1}{E_2 + \sqrt{1 + \left(\frac{V_0}{V_{0ак}}\right)^2}}, \quad (2.45)$$

где $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi = E_2 \left(\frac{\pi}{2}, k \right)$ – полный эллиптический интеграл второго рода.

Отсюда следует, что при прочих равных условиях это приращение определяется только значением скоростного коэффициента

$k_v = \frac{V_{0ак}}{V_0}$ с уменьшением которого значение η_1 снижается. Приняв,

что приращение пути скольжения сопровождается пропорциональным усилением полирующего эффекта, можно заметить следующее обстоятельство, касающееся влияния ультразвука на формирование шероховатости поверхности распиленной заготовки. Оно связано с тем, что скорость относительного скольжения боковой поверхности диска с пропиленной поверхностью алмаза по глубине распила не является постоянной. При неизменной частоте вращения диска ее максимальное значение имеет место на участках, расположенных вблизи его торцевой поверхности, т.е. в зоне распиливания, а на участках, примыкающих к началу распила ее значение минимально. Причем по мере увеличения глубины распила разность между ними возрастает. Поэтому при постоянной амплитуде ультразвуковых колебаний (заметим, что $\lambda/4 \gg b$), значение скоростного коэффициента на периферии диска всегда будет меньше его значения на участках, соответствующих началу распиливания. Следовательно, наибольшее интенсифицирующее влияние на процесс распиливания, а, соответственно, и на полирующий эффект ультразвуковые колебания будут оказывать на участки пропиленной заготовки, расположенные в начале распила по мере его увеличения оно будет снижаться. Таким образом, по сравнению с традиционной обработкой при распиливании с ультразвуком за счет интенсификации процесса изнашивания контактирующих поверхностей, обусловленного приращением пути трения, в значительной степени больше проявляется полирующий эффект, что приводит к снижению шероховатости распиленного кристалла. При этом в наибольшей степени на снижение высоты микронеровностей ультразвук оказывает на участки поверхности алмаза, расположенные в начале распила, а по мере увеличения его влияние снижается. Исходя из этого, попутно заметим, что в принципе, возможно подобрать такое соотношение

амплитуды колебательной скорости $V_{\text{оак}}$ и скорости скольжения V_0 , при котором бы обеспечивался равномерный по глубине распила износ контактирующих боковых поверхностей распиловочного диска, т.е. устранялось бы формирование его конусности в радиальном сечении, свойственное традиционному распиливанию.

В-третьих, как было показано в предыдущем разделе, под действием ультразвуковых колебаний возрастает интенсивность распиливания, а, следовательно, сокращается время выполнения операции. Это приводит к уменьшению продолжительности процесса изнашивания пропиленной поверхности кристалла о боковые поверхности распиловочного диска, что сокращает время проявления полирующего эффекта и, соответственно, должно вызывать повышение шероховатости обработанной поверхности алмаза.

Таким образом, на условия формирования микрогеометрии распиленной поверхности кристалла алмаза при ультразвуковом воздействии комплексно будут влиять все выше отмеченные факторы. При этом, если первых два вызывают снижение шероховатости, то третий обуславливает ее повышение. Следовательно, конечное состояние распиленной поверхности кристалла алмаза будет определяться степенью влияния или вкладом каждого из этих факторов на условия формирования ее шероховатости.

Вместе с тем, следует подчеркнуть, что между отмеченными факторами существует тесная взаимосвязь и взаимовлияние, что не позволяет однозначно оценивать вклад каждого из них на условия формирования шероховатости поверхности распиленного алмаза без учета влияния остальных. Так повышение интенсивности ультразвука за счет увеличения амплитуды колебаний, приводит к некоторому возрастанию размера скалываемых частиц алмаза, вызывая повышение, как мы видим, первоначальной его шероховатости. Кроме того, это обуславливает сокращение времени распиливания, что также должно вызывать увеличение высоты микронеровностей на распиленной поверхности кристалла. Однако, одновременно с этим, за счет повышения амплитуды относительных колебательных смещений боковых поверхностей распиловочного диска с пропиленной поверхностью алмаза, существенно интенсифицируется процесс ее изнашивания, в результате чего значительно возрастает проявление полирующего эффекта, вызывая тем самым снижение шероховатости поверхности распиленного кристалла. Поэтому ее

окончательное состояние будет определяться' с одной стороны степенью влияния амплитуды колебаний на формирование параметров первоначальной шероховатости, а с другой – на степень проявления полирующего эффекта, которому принадлежит ведущая роль в окончательном формировании шероховатости распиленной поверхности алмаза. С аналогичных позиций следует оценивать влияние и других параметров, характеризующих режим обработки, на условия формирования микрогеометрии поверхности распиленных площадок алмаза.

Вместе с тем, исходя из описанного выше механизма формирования шероховатости, можно утверждать, что при распиливании с ультразвуком высота микронеровностей поверхности распиленного алмаза также будет переменной по глубине пропила. При этом, как и при традиционной обработке, минимальное ее значение будет иметь место на участках входа распиловочного диска в заготовку, а по мере увеличения глубины пропила высота микронеровностей на поверхности алмаза будет возрастать, достигая своего максимального значения на участках выхода инструмента. Эта закономерность, как было указано выше, объясняется различным по продолжительности проявлением полирующего эффекта по глубине распила кристалла алмаза. Если допустить, что при распиливании с ультразвуком за счет снижения высоты микронеровностей первоначальной шероховатости и интенсификации полирующего эффекта, шероховатость распиленной площадки кристалла окажется меньше по сравнению с традиционной обработкой, то зависимость $Rz(b)$ качественно будет иметь вид, как показано на рис. 2.15,в (кривая 2).

Однако окончательное подтверждение достоверности раскрытых особенностей в механизме формирования шероховатости распиленной поверхности заготовок с установлением соответствующих количественных соотношений может быть получено на основании обобщения и анализа результатов экспериментальных исследований.

2.2. Методика проведения экспериментальных исследований влияния ультразвуковых колебаний на процесс распиливания хрупких неметаллических материалов

С целью подтверждения достоверности результатов теоретических исследований, а также количественной оценки влияния ультразвуковых колебаний на основные показатели процесса механического распиливания хрупких материалов был проведен комплекс экспериментальных исследований. Ниже приведены основные положения методики проведения.

2.2.1. Экспериментальная установка с контрольно-измерительным комплексом, примененные в исследованиях

При разработке конструкции экспериментальной установки по изучению процесса механического распиливания хрупких материалов необходимо было учитывать следующее. Она должна обеспечивать выбранное направление введения ультразвуковых колебаний при обработке, то есть они должны быть направлены перпендикулярно торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска. В качестве активного элемента, то есть элемента, через который ультразвуковые колебания вводятся в зону распиливания, должна использоваться обрабатываемая заготовка (образец). Для оценки влияния технологических и акустических параметров, то есть режимов обработки, на основные показатели процесса распиливания конструкция установки должна обеспечивать:

- изменение (регулирование) частоты вращения распиловочного диска (скорости резания);
- изменение (регулирование) величины статического усилия прижима заготовки к торцевой поверхности распиловочного диска;
- величину амплитуды вводимых в зону обработки продольных ультразвуковых колебаний.

Кроме того, весьма важно предусмотреть в конструкции установки такие технические решения, которые позволили бы в процессе распиливания осуществлять непрерывное измерение и регистрацию его основных показателей, В частности, скорость распилива-

ния, величину сил сопротивления, действующих в зоне обработки, и значение температуры в ней.

С учетом обеспечения выше отмеченных требований была спроектирована и изготовлена специальная установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования по механическому распиливанию образцов, как в обычных условиях, так при ультразвуковом воздействии. Принципиальная схема установки с контрольно-измерительным комплексом приведена на рис. 2.16.

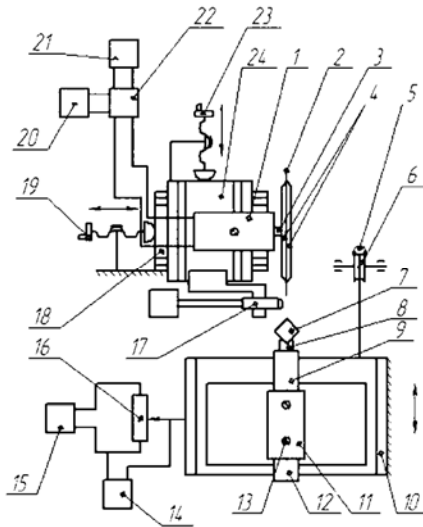


Рис. 2.16. Принципиальная схема экспериментальной установки с измерительным комплексом: 1 – электродвигатель; 2 – распиловочный диск; 3 – электродвигатель постоянного тока; 4 – фланцы; 5 – сменные грузы; 6 – тросовая система; 7 – заготовка; 8 – сменная оправка; 9 – концентратор; 10 – шариковые направляющие; 11 – втулка; 12 – ультразвуковой магнитострикционный преобразователь продольных колебаний; 13 – стопорный винт; 14 – блок самопишущего прибора Н-307-3; 15 – источник питания; 16 – реохордный преобразователь линейных перемещений; 17 – движок; 18 – направляющая скольжения; 19 – механизм подачи; 20 – вход блока у самопишущего прибора Н-307-3; 21 – регулируемый источник питания ИРН-53; 22 – сравнивающее устройство; 23 – механизм подачи; 24 – направляющая скольжения

Она состоит на двух основных узлов: узла привода распиловочного диска и узла акустической системы с механизмом нагружения,

смонтированным на общем массивном основании. Первый включает в себя электродвигатель постоянного тока 3 мод. Д-25 Г, на валу 3 которого с помощью фланцев 4 закрепляется алмазный распиловочный диск 2. Питание электродвигателя осуществляется от выпрямителя с регулятором напряжения, что позволяет в ходе экспериментов изменять частоту вращения его ротора, а, соответственно, и скорость вращения распиловочного диска. Для осуществления необходимых перемещений инструмента относительно заготовки при настройке установки с помощью механизмов подачи 19 и 23, электродвигатель установлен на направляющих скольжения 8 и 24, обеспечивающих его перемещение в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Узел акустической системы включает в себя ультразвуковой магнитострикционный преобразователь продольных колебаний 12, который посредством цилиндрического корпуса установлен по скользящей посадке во втулке 11 и закреплен стопорным винтом 13. Благодаря цилиндрическому сопряжению, обеспечиваются необходимые при настройке установочные перемещения вдоль оси преобразователя относительно распиловочного диска. На выходном торце концентратора 9 ультразвукового преобразователя посредством резьбового соединения закрепляется сменная оправка 8, на которой с помощью клеевого состава крепится обрабатываемая заготовка (образец) 7. Втулка 11 с закрепленным в ней преобразователем установлена на шариковых направляющих 10, допускающих их плавное, с минимальным трением, перемещение вдоль оси преобразователя, то есть в направлении колебательных смещений обрабатываемой заготовки. Последняя вместе с акустическим узлом посредством трособлочной системы 6 и аттестованных сменных грузов 5 прижимается к торцевой поверхности распиловочного диска, чем обеспечивается требуемый уровень статического нагружения в процессе распиливания. Частота вращения распиловочного диска контролировалась путем измерения частоты вращения вала электродвигателя с помощью тахометра типа ТМЗ-Л. Задание фиксированных значений частоты вращения двигателя осуществлялось путем изменения напряжения питания с блока управления.

Для измерения и регистрации в процессе обработки текущего значения глубины распила, то есть, величины перемещения заготовки вместе с акустическим узлом относительно торцевой (режу-

шей) поверхности распиловочного диска, установка была оснащена реохордным преобразователем линейных перемещений 16, движок 17 которого жестко связывался с подвижной частью шариковых направляющих. Использование преобразователя такого типа в данном случае полностью оправдано, так как реохордные преобразователи имеют линейную характеристику в большом диапазоне измеряемых перемещений, надежны в работе и просты в эксплуатации. Преобразователь был включен по схеме делителя постоянного напряжения, таким образом, что коэффициент деления, а, следовательно, и выходное напряжение однозначно зависило от величины перемещения движка реохорда и, в конечном итоге, от глубины пропила заготовки. На реохорд подавалось напряжение 8 В от стабилизированного источника питания 15 типа «Агат», а для регистрации измерительного сигнала, пропорционального глубине пропила, использовался блок самопишущего прибора Н-307-3 (поз. 14 на рис. 2.16). Тарировка реохордного преобразователя в комплекте с прибором Н-307-3 осуществлялась с помощью набора плоскопараллельных концевых мер длины, посредством которых задавались аттестованные перемещения акустического узла, а на приборе фиксировались соответствующие им значения выходного сигнала. При этом текущее время фиксируется по скорости протяжки осциллографической бумаги. Таким образом, разработанная методика и примененная контрольно-измерительная аппаратура позволили в ходе экспериментальных исследований довольно просто, но вместе с тем надежно и с требуемой точностью, измерить и регистрировать непосредственно в процессе обработки изменение глубины пропила заготовки, а, соответственно, оценивать интенсивность распиливания и производительность выполнения операции при различных условиях и режимах ее выполнения.

С целью измерения и регистрации сил сопротивления, действующих в зоне обработки в процессе распиливания заготовок, использовался метод, основанный на оценке изменения величины тока, потребляемого электродвигателем привода вращения распиловочного диска. Для этого в цепь его питания (рис. 2.17) было включено сопротивление величиной R_1 величиной 1 Ом. Падение напряжения на нем подавалось на один вход сравнивающего устройства 22 (рис. 2.16). На второй вход сравнивающего устройства подавалось напряжение от регулируемого источника питания ИРН-53 (поз. 21,

рис. 2.16), равное падению напряжения на сопротивлении при отсутствии нагрузки на электродвигателе, т.е. в режиме холостого хода. Разность между этим напряжением пропорциональная величине сил сопротивления, действующих в зоне обработки в процессе распиливания, с выхода сравнивающего устройства 22 подавалась на вход блока у самопишущего прибора Н-307-3 (поз.20, рис. 2.16), где регистрировалась на бумаге. Для установки начального (нулевого) уровня сигнала на входе самопишущего прибора устанавливался потенциометр R3 (рис. 2.17).

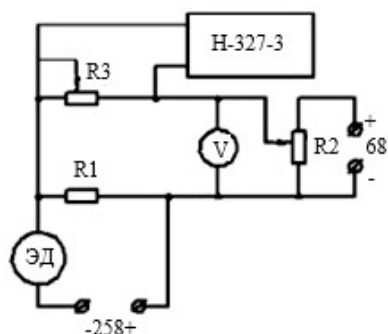


Рис. 2.17. Принципиальная электрическая схема для измерения силы сопротивления

В качестве примера на рис. 2.18 приведена запись изменения сил сопротивления, действующих в зоне обработки, за время распиливания образца.

Тарировка этой измерительной схемы осуществлялась с помощью специального приспособления, схема которого приведена на рис. 2.19.

Момент сопротивления на валу $M_{сопр}$ электродвигателя создавался силой трения $F_{тр}$ возникающей в результате действия на вал силы N со стороны рычага 2, нагруженного грузами 3. Тогда сила взаимодействия N определяется из условия равенства моментов сил относительно оси рычага.

$$Nl = PL, \text{ откуда } N = \frac{PL}{l}.$$

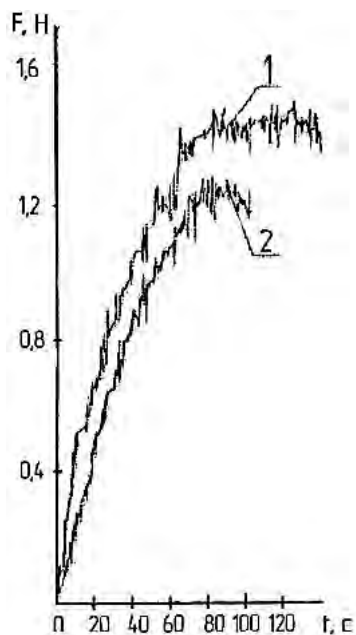


Рис. 2.18. Осциллограмма сил сопротивления при распиливании от глубины пропила: 1 – без ультразвуковых колебаний; 2 – с ультразвуковыми колебаниями ($A_0 = 4$ мкм, $P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с)

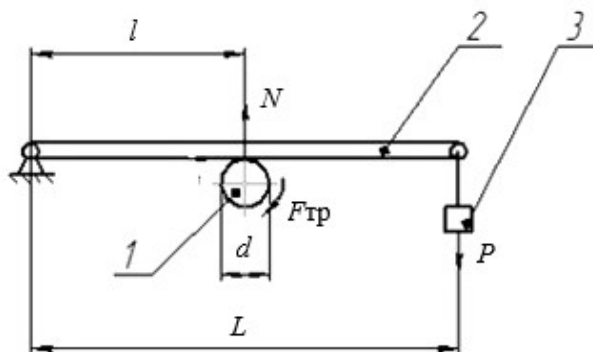


Рис. 2.19. Приспособление для построения тарифовочной зависимости тока, потребляемого двигателем: 1 – вал электродвигателя; 2 – рычаг; 3 – груз

Сила трения определялась как

$$F_{\text{тр}} = Nf = \frac{fPL}{l},$$

где f – коэффициент трения в паре материал вала – материал рычага.

Создаваемый момент сопротивления вычислялся по выражению

$$M_c = F_{\text{тр}} \frac{d}{2} = \frac{dfPL}{2l}, \quad (2.46)$$

где d – диаметр вала электродвигателя.

Для определения тарировочной зависимости изменялось усилие нагружения P , то есть момент M_c , и измерялся ток, потребляемый электродвигателем.

Следует заметить, что в зависимости (2.45) для вычисления момента сопротивления принималось табличное значение коэффициента трения f , а не его действительная для данных условий трения величина, что приводило к появлению соответствующей систематической погрешности. Однако в рамках решаемых задач она не влияла на конечный результат именно сравнительных испытаний в силу того, что ее величина как при распиливании в обычных условиях, так и с ультразвуком была постоянной. При этом следует подчеркнуть, что в ходе выполнения экспериментов как изменение глубины распила, так и значение сил сопротивления, действующих в зоне обработки, одновременно регистрировались на одной осциллографической бумаге, что значительно облегчало анализ полученных результатов их достоверность.

Для измерения температуры, возникающей в зоне распиливания, использовали метод искусственной термопары. С этой целью в исследуемом образце предварительно просверливали алмазным сверлом глухие отверстия диаметром 0,5 мм, как показано на рис. 2.20.

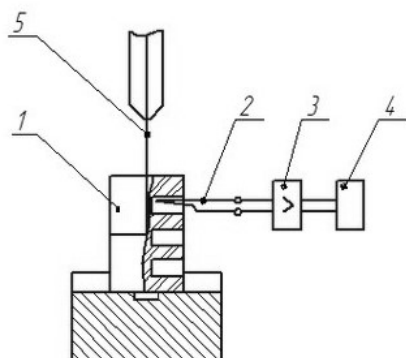


Рис. 2.20. Принципиальная схема устройства для измерения температуры в зоне обработки: 1 – образец; 2 – термопара; 3 – усилитель; 4 – осциллограф; 5 – распиловочный диск

Они выполнялись с таким расчетом, чтобы дно отверстий располагалось на расстоянии порядка 0,2–0,3 мм от предполагаемой плоскости распиливания. На образце в эти отверстия помещали «горячий» спай термопары хромель-алюмель, и они заполнялись композицией, состоящей из эпоксидной смолы кварцевого порошка в объемном соотношении 1:1.

После затвердевания композиции оценивалась прочность закрепления термопары и ее работоспособность. Затем образец с термопарой приклеивали к сменной оправке по выше описанной технологии. По завершению этих подготовительных работ, оправка с образцом закреплялась на выходном торце концентратора ультразвукового преобразователя, и после соответствующей установки заготовки относительно режущей кромки инструмента осуществлялось ее распиливание.

Возникающая при этом термо-ЭДС, пропорциональная значению температуры в зоне обработки, усиливалась специальным усилителем постоянного тока и фиксировалась с помощью самопишущего прибора Н-307-3 (рис. 2.16). Сигнал термопары поступал на базу транзистора Т1, на второй вход (база транзистора Т2) подавалось опорное напряжение с делителя R4-R7-R12, которое можно регулировать потенциометром R7. Сигнал с выхода усилителя поступал на

самопишущий прибор Н-307-3. Для установки начального уровня сигнала на входе самописца предусмотрен потенциометр R6. Потенциометр R10 предназначен для регулировки усиления схемы.

Тарировка термопары в комплекте с измерительной аппаратурой осуществлялась по известным методикам с применением трех реперных точек: 0°C – температура таяния льда; 100°C – температура кипения воды; 190°C – температура плавления припоя ПОС-61. Полученный тарировочный график приведен на рис. 2.21, на рис. 2.22 показана осциллограмма изменения температуры в зоне обработки за время распиливания образца.

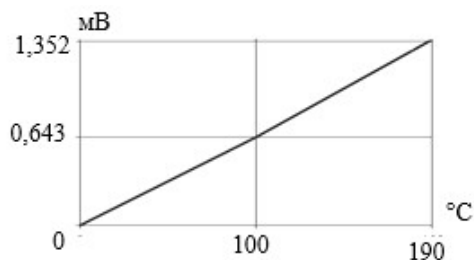


Рис. 2.21. Тарировочный график изменения температуры в зоне распиливания

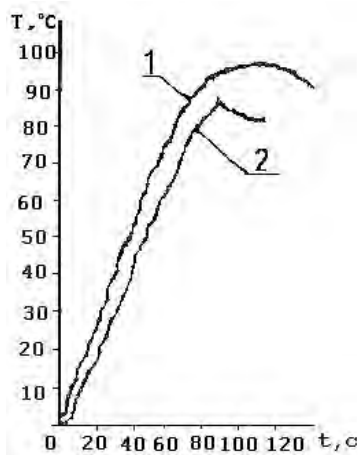


Рис. 2.22. Осциллограмма зависимости температуры в зоне обработки от глубины распиливания: 1 – без ультразвуковых колебаний; 2 – с ультразвуковыми колебаниями ($A_0 = 4$ мкм, $P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с)

На рис 2.23 показана фотография общего вида экспериментальной установки вместе с контрольно-измерительным комплексом.



Рис. 2.23. Общий вид экспериментальной установки вместе с контрольно-измерительным комплексом

2.2.2. Материалы, образцы и инструменты, примененные в исследованиях

При выборе материала для проведения сравнительных экспериментальных исследований по его распиливанию, как в обычных условиях, так и с ультразвуком необходимо было учитывать следующее объективное обстоятельство. Оно связано с тем, что из-за высокой стоимости и дефицитности, а также особого регламента при обработке драгоценных камней, провести полномасштабное экспериментальные исследования непосредственно на этих материалах не представлялось возможным.

Исходя из этого, а также принимая во внимание, что в рамках решаемых задач в принципе необходимо количественно оценить влияние ультразвуковых колебаний на основные показатели механического распиливания хрупких материалов и тем самым установить степень достоверности теоретических положений, то в качестве объекта испытаний было выбрано стекло К8. Это доступный в требуемых для проведения экспериментов количествах материал, достаточно хорошо обрабатывается, что важно при изготовлении из

него образцов и имеет критерий хрупкости $t_x > 2$, такой же, как у алмаза.

Образцы для распиливания изготавливались из партии стекла К8 и после механической обработки, включающей операции разрезания и шлифования, представляли собой кубики со стороной $5+0,5$ мм. Выбор такой формы продиктован возможностью распиливания образцов «на ребро», как это происходит при обработке кристаллов алмаза, и как было принято в ходе теоретических исследований.

Подготовленные образцы с помощью клеевого состава закреплялись на сменной оправке, которая устанавливалась на выходном торце концентратора ультразвукового преобразователя, образуя с ним резонансную акустическую систему. На рис 2.24 показано конструктивное исполнение оправки, изготовленной из сплава Д16Т. Выбор этого материала обусловлен тем, что сплав Д16Т имеет достаточно высокую циклическую прочность, обладает малым акустическим сопротивлением и хорошо обрабатывается резанием, что важно при изготовлении сменных оправок.

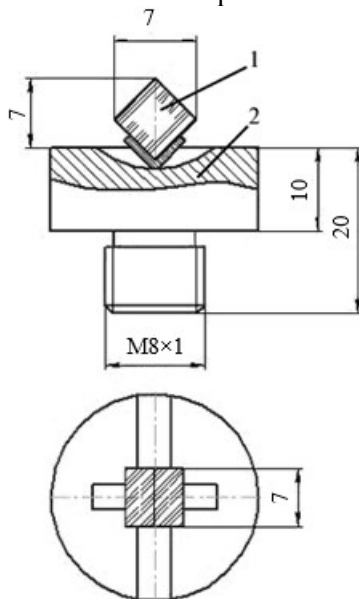


Рис. 2.24. Конструкция оправки со стеклянным образцом для схемы распиливания «на ребро»: 1 – стеклянный образец; 2 – сменная оправка

С помощью резьбового хвостовика М8х1 оправка закрепляется на выходном торце концентратора ультразвукового преобразователя, для чего на ее цилиндрической части предусмотрены лыски под ключ. Торцевая поверхность оправки служит для закрепления на ней с помощью клеевой композиции обрабатываемого образца. Учитывая, что образцы должны устанавливаться «на ребро», для обеспечения их требуемой ориентации на торцевой поверхности оправки обрабатывался V-образный паз с углом при вершине 90°, по которому своими соседними боковыми гранями базировались стеклянные кубики, и тем самым достигалось их необходимое положение при распиливании. Кроме того, по середине торцевой поверхности оправки в перпендикулярном V-образной канавки обрабатывался паз шириной 2 мм, выполненный по радиусу 40 мм. Необходимость этого конструктивного элемента продиктована требованием обеспечения свободного выхода режущей кромки распиловочного диска по окончании процесса распиливания образцов, то есть на стадии их разделения на части.

Важным моментом при разработке методики проведения экспериментальных исследований являлся вопрос определения клеевой композиции для закрепления стеклянных образцов на оправках при сообщении им ультразвуковых колебаний. Как известно, в этих условиях на границе соединения происходит интенсивное рассеяние акустической энергии, что приводит к существенному разогреву зоны контакта и в конечном счете к разрушению места соединения. Поэтому переходной слой необходимо проектировать по минимуму отражательной способности клеевого слоя по отношению к ультразвуковым колебаниям заданной частоты. Используя методику расчета переходного слоя при прохождении ультразвуковых волн через грани раздела сред, изложенную в работах, был определен состав и концентрация клеящей композиции в работах обеспечивающих минимальные потери акустической энергии в переходном слое и наибольшую циклическую прочность соединения. Так в качестве связующего вещества применялась эпоксидная смола, а в качестве наполнителя – кварцевая пыль с размером частиц 1–2 мкм, с концентрацией последнего в клеевой композиции 0,71 по объему.

Для обеспечения высокого качества закрепления образцов на оправках необходимо было тщательно отработать и соблюдать технологию приклеивания, которая включала в себя следующие основ-

ные этапы. Предварительно подготавливалась в необходимых количествах клеевая композиция, для чего в эпоксидную смолу в соответствующей концентрации добавлялась кварцевая пыль, и полученная смесь тщательно перемешивалась до получения однородной массы. После этого, поверхность V-образной канавки на оправке и поверхности образцов промывались бензином, высушивались и обезжиривались ацетоном. Затем оправки с помощью резьбового хвостовика закреплялись в массивном приспособлении (плите), располагаясь вверх торцевыми поверхностями. После этого, в подготовленную клеевую композицию добавлялся отвердитель и после ее перемешивания, с помощью деревянной палочки она наносилась тонким слоем как на поверхность V-образной канавки, так и на установочные поверхности образцов. Затем образцы устанавливались в V-образную канавку оправки с таким расчетом, чтобы предусмотренный в ней паз для выхода распиловочного диска, располагался по середине обрабатываемой заготовки. После окончательной корректировки положения образцов на оправках, приспособление с ними помещалось в сушильный шкаф, где с плавным повышением температуры до 80° С они выдерживались при ней в течение 6 часов до полной полимеризации (отверждения) клеевой композиции. По истечении этого времени, приспособление с оправками извлекалось из сушильного шкафа и остывало на воздухе до комнатной температуры. Подготовленные таким образом образцы использовались при проведении исследований по их распиливанию на экспериментальной установке, как в обычных условиях, так и при ультразвуковом воздействии.

После окончания эксперимента по распиливанию образцов для их снятия с оправок последние вывинчивались с отверстия концентратора ультразвукового преобразователя и помещали на электроплитку, где нагревались до размягчения клеящего состава. Затем с помощью пинцета распиленные части снимались с оправки, очищались, промывались в ацетоне и высушивались.

Далее подготовленные таким образом разделенные части образцов, проходили исследования по оценке качества их распиленных поверхностей.

Качество площадок распиленных образцов оценивалось путем измерения шероховатости их поверхности на профилометре-профилографе мод. 252, а также посредством визуального их обсле-

дования на микроскопе БМИ при различных значениях увеличения. Измерение шероховатости поверхности проводили в направлении перпендикулярном следам обработки на распиленных площадках. При этом на каждой их них шероховатость измерялась в трех зонах по глубине распила, то есть в начале распиливания, по середине площадки и в конце пропила. Примеры профилограмм поверхностей образцов, распиленных в обычных условиях обработки, и ультразвуком показаны на рис 2.25.

При выборе инструмента для проведения экспериментальных исследований по распиливанию стеклянных образцов учитывались следующие обстоятельства. Режущая кромка распиловочного диска должна иметь минимальную толщину, но при этом его жесткость должна быть достаточной, чтобы воспринимать статическую нагрузку без деформаций.

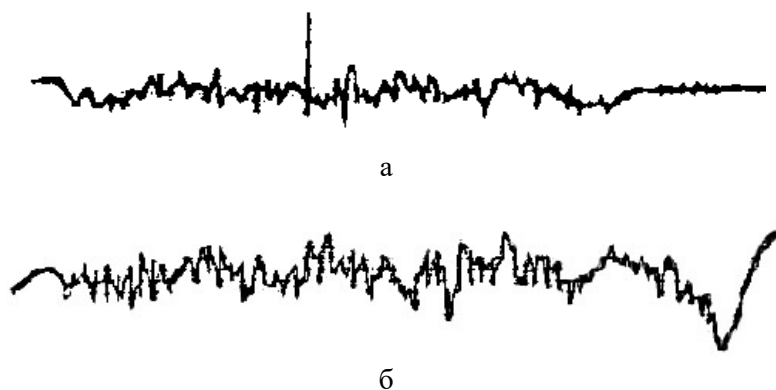


Рис. 2.25. Профилограмма шероховатости поверхности образцов распиленных при различных режимах: а – с ультразвуковыми колебаниями ($A_0 = 4$ мкм, $P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с); б – без ультразвуковых колебаний ($P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с)

Помимо этого, важно, чтобы стойкость распиловочного диска была достаточно высокой, позволяющая осуществлять обработку стеклянных образцов как с ультразвуком, так и без него при неизменной режущей способности. Другими словами износ распиловочного диска при выполнении серии экспериментов не должен

оказывать заметного влияния на выходные показатели процесса распиливания.

Исходя из этого, в качестве режущего инструмента был выбран стальной отрезной алмазный диск диаметром 75 мм и толщиной 0,16 мм, на боковых сторонах которого методом гальванопластики были закреплены алмазные зерна зернистостью 28/20. При этом один инструмент использовался для проведения отдельной серии экспериментов по очередному распиливанию образцов, как в обычных условиях обработки, так и при ультразвуковом воздействии.

Экспериментальные исследования по распиливанию выполнялись по аналогии с распиливанием монокристаллов алмаза и других драгоценных камней без применения технологической среды.

2.2.3. Ультразвуковое оборудование, примененное в исследованиях

В качестве источника ультразвуковых колебаний при проведении экспериментальных исследований по распиливанию стеклянных образцов использовался полуволновой магнитострикционный никелевый электроакустический излучатель с полуволновым коническим концентратором из комплекта ультразвукового низкочастотного УЗДН-1. Номинальная резонансная частота ультразвукового преобразователя составляла 22 кГц с ее плавной регулировкой в пределах от 18 до 24 кГц и выходной мощности от 0 до 60 Вт. Применение такого универсального комплекса позволило успешно решать основные задачи экспериментальных исследований. В частности обеспечить значительный запас выходной мощности при выполнении экспериментов, а благодаря ее плавной регулировке можно было соответствующим образом изменять и устанавливать необходимое значение амплитуды продольных ультразвуковых колебаний, сообщаемых обрабатываемому образцу. Измерение частоты ультразвуковых колебаний, вводимых в зону распиливания, осуществлялась с помощью цифрового частотомера мод. ЧЗ-57, включенного параллельно в цепь питания обмотки возбуждения магнитострикционного преобразователя. Ее значение, соответствующее резонансному режиму работы акустической колебательной системы, фиксировалось по максимальному значению тока анода (нагрузки) генератора в процессе плавного изменения его частоты.

Для измерения значений амплитуды ультразвуковых колебаний, сообщаемых обрабатываемому образцу, был применён оптический метод суть которого заключается в следующем. На станине экспериментальной установки монтировался микроскоп увеличением 300х. С его помощью фиксировалось точка на поверхности оправки в непосредственной близости от ее торцевой поверхности, на которой приклеивается испытуемый образец. Затем оправке сообщались ультразвуковые колебания, в результате чего эта точка «размывалась», превращаясь в линию вдоль направления действий колебаний. Длина этой линии равняется размаху колебаний, то есть удвоенное значение амплитуды колебаний.

Для удобства и простоты установки требуемого значения амплитуды ультразвуковых колебаний в ходе проведения экспериментальных исследований предварительно была получена тарировочная зависимость между значением амплитуды колебаний силы тока в цепи анода ультразвукового генератора, значение которого определяется с помощью амперметра, установленного на лицевой панели генератора.

2.2.4. Последовательность выполнения экспериментальных исследований

В ходе отработки методики проведения экспериментальных исследований была установлена последовательность выполнения каждого опыта распиливание образцов определяющие порядок и содержание всех необходимых приемов. В начале оправка с наклеенным стеклянным образцом зажималась в резьбовое отверстие концентратора ультразвукового преобразователя. При этом для обеспечения надежного акустического контакта, сопрягаемые поверхности концентратора предварительно смазывалась вазелиновым маслом. Затем на вал электродвигателя 3 (рис. 2.16) устанавливался распиловочный диск, контролировалось его торцевое и радиальное биение и, после соответствующих регулировок по минимизации их значение, инструмент окончательно закреплялся на двигателе. Причем, учитывая высокую износостойкость алмазного диска при обработке стеклянных заготовок на небольшую глубину, эта операция выполнялась и при его замене после распиливания образцов.

После этого отпуская стопорный винт 17 (рис. 2.16) и путем поворота цилиндрического корпуса преобразователя во втулке 16 добивались такого его положения, при котором ось симметрии V-образного паза по оправке была бы перпендикулярна плоскости распиливания, то есть плоскости распиловочного диска. Достигнутые таким образом положения ультразвукового преобразователя фиксировались стопорным винтом 17. Затем путем перемещения узла привода по направляющим скольжения 2 и 3 (рис. 2.16) корректировалось положение режущей кромки распиловочного диска таким образом, чтобы она располагалась посередине обрабатываемой заготовки и при этом величина хода преобразователя по направляющим подачи составляла не менее 10 мм. После этого согласно плана экспериментов, устанавливались необходимые значения входных параметров. Для создания требуемой величины статической нагрузки на трособлочной установке помещался (подвешивался) аттестованный груз соответствующие массы. Необходимое значение частоты вращения вала электродвигателя устанавливалась путем подачи на электродвигатель соответствующего напряжения согласно тарировочной зависимости за счет переключения обмоток трансформатора в блоке питания. Если эксперимент выполнялся без применения ультразвука, то на этом установка требуемых значений входных параметров заканчивалась.

После этого непосредственно перед распиливанием преобразователь по направляющим качения в начале плавно ручную подводился к инструменту до касания его поверхности обрабатываемой заготовки, а далее их взаимодействие происходило под действием заданной статической нагрузки. В этом положении на приборе Н 307-3 устанавливались нулевые значения измеряемых выходных параметров и выключалась протяжка осциллографической бумаги. После этого выключался привод вращения распиловочного диска и начинался процесс обработки. Одновременно с этим запускался секундомер. По завершении распиливания образца, секундомер останавливался и отключалась протяжка осциллографической бумаги на приборе Н 307-3 с зафиксированными значениями выходных параметров. Затем преобразователь вместе с распиленным образцом отводился в сторону от инструмента и фиксировался в этом положении. С помощью гаечного ключа оправка с образцом вывинчивалась из отверстия концентратора ультразвукового преобразователя

и помещалась на электроплиту для снятия разделенных частей образца. Зависимость глубины пропила с УЗК и без УЗК представлена на рис. 2.26.

При проведении экспериментов по распиливанию образцов с ультразвуком помимо описанных выше приемов проводилась дополнительная процедура, связанная с установлением требуемого значения амплитуды колебаний сообщаемых заготовке. Для этого после того, как были установлены необходимые величины статической нагрузки и скорости резания заготовки вместе с преобразователем отводилась от торцевой поверхности распиловочного диска. В этом положении преобразователь от ультразвукового генератора возбуждался на резонансной частоте, что фиксировалось по максимальному значению тока анода и измерялось частотомером ЧЗ-57. Затем, пользуясь тарировочным графиком, за счет регулирования выходной мощности генератора устанавливалась требуемое значение амплитуды ультразвуковых колебаний сообщаемых образцу.

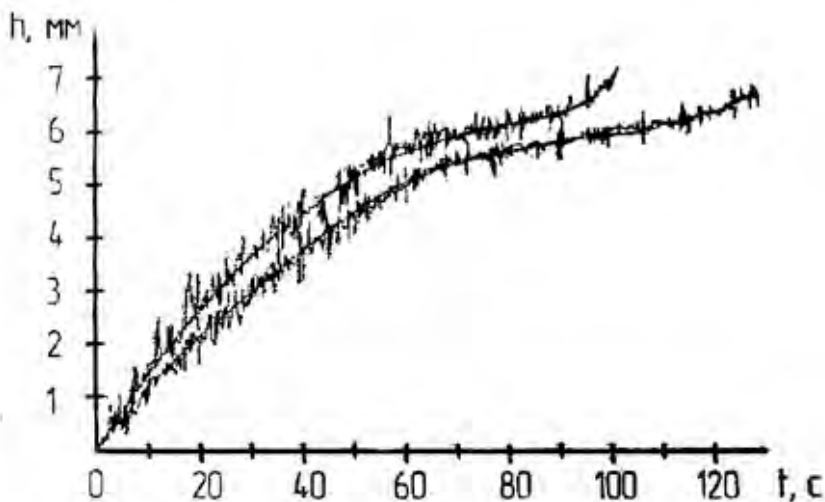


Рис. 2.26. Оциллограмма изменения глубины пропила от времени обработки:
1 — без ультразвуковых колебаний; 2 — с ультразвуковыми колебаниями
($A_0 = 4$ мкм, $P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 5,5$ м/с)

После этого ультразвуковые колебания выключались и заготовка плавно подводилась до контакта с торцевой поверхности распиловочного диска, и далее они взаимодействовали под действием заданной статической нагрузки. Затем включался привод вращения установочного диска, и одновременно с этим возбуждался магнито-стрикционный преобразователь, сообщая ультразвуковые колебания обрабатываемой заготовке.

С целью уменьшения влияния на выходные параметры изучаемого процесса переменной систематической погрешности, обусловленной износом инструмента, опыты по распиливанию в каждой серии эксперимента выполнялись поочередно. Т.е. при неизменных значениях статической нагрузки и скорости резания обработка осуществлялась в начале в обычных условиях, затем при ультразвуковом воздействии и так далее.

После выполнения серии экспериментальных исследований проводилась расшифровка полученных осциллограмм, в результате чего определялись численные значения и характер изменения глубины пропила, момента сил сопротивления и температуры в зоне обработки, а также измерялась величина параметра R_z распиленной поверхности образцов, соответствующих различным условиям и режимам обработки.

2.3. Экспериментальные исследования процесса распиливания хрупких неметаллических материалов с ультразвуком

В данном разделе приведены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния ультразвуковых колебаний на основные показатели процесса механического распиливания хрупких материалов на примере стекла К8. В частности, на интенсивность (производительность) распиливания, величину сил сопротивления, действующих в процессе обработки; качество поверхности площадок распиленных заготовок и температуру в зоне распиливания. На основе анализа полученных данных и их сопоставления с результатами и положениями теоретических исследований, дано объяснение влияния ультразвука на указанные показатели процесса распиливания хрупких материалов и определены рациональные режимы обработки в отношении производительности и качества распиливания таких материалов.

2.3.1. Влияние ультразвука на интенсивность распиливания

Как уже указывалось, применительно к распиливанию кристаллов алмаза интенсивность процесса оценивается отношением площади поверхности реза ко времени обработки ($\text{мм}^2/\text{мин}$, $\text{мм}^2/\text{с}$).

Примененная в исследованиях экспериментальная установка позволяла осуществлять непрерывную регистрацию глубины распиливания заготовки во время обработки, начиная с момента врезания до окончательного ее разделения. Так на рис. 2.27, представлены зависимости глубины распила h от времени обработки t для различных статических нагрузок при распиливании в обычных условиях и с введением в зону обработки ультразвуковых колебаний частотой 21,9 кГц и амплитудой $A_0 = 4$ мкм. В этой серии экспериментов окружная скорость диска была постоянной и составляла 7,9 м/с.

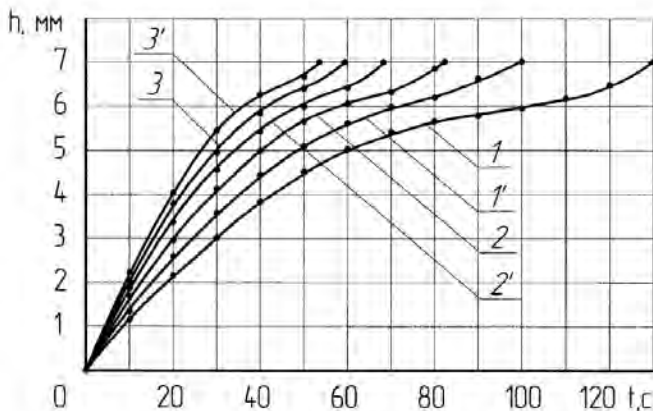


Рис. 2.27. Зависимость глубины пропила от времени обработки при различных значениях статической нагрузки ($A_0 = 4$ мкм; $V_0 = 7,9$ м/с): 1 и 1' — соответственно без ультразвуковых колебаний и с ультразвуковыми колебаниями $P_{ст} = 0,45$ Н; 2 и 2' — для $P_{ст} = 0,6$ Н; 3 и 3' — для $P_{ст} = 1,0$ Н

Из анализа этих зависимостей видно, что по сравнению с обработкой в обычных условиях введение ультразвуковых колебаний во всех случаях повышает интенсивность распиливания. Для количественной оценки степеней влияния ультразвуковых колебаний на

повышение производительности распиливания введем коэффициент эффективности η_t , определяемый по выражению

$$\eta_t = \frac{t_{ст} - t_{ак}}{t_{ст}} \times 100\%, \quad (2.47)$$

где $t_{ак}$ и $t_{ст}$ – соответственно, время распиливания образца фиксированной глубины при обработке с ультразвуком и в обычных условиях.

Как видно из рис. 2.27, зависимости $h(t)$ во всех случаях имеют три характерных участка. Так в начале обработки (от момента врезания) глубина распила h растет практически прямо пропорционально времени t . Затем, в зависимости от режимов обработки, наступает момент, при котором интенсивность распиливания начинает снижаться, что приводит к появлению на кривых второго, более пологого участка, который сменяется третьим участком, соответствующим стадии разделения заготовки, на котором интенсивность распиливания несколько возрастает, вплоть до окончания обработки.

Такая ситуация объясняется тем, что по мере заглубления распиловочного диска в заготовку происходит возрастание площади контакта его торцевой поверхности с обрабатываемым материалом, а также его боковых поверхностей с пропиленной поверхностью заготовки. Так как образцы распиливались на «ребро», то после разрезания заготовки до половины, площадь контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемым материалом начинает уменьшаться, в то время как поверхность контакта с его боковыми поверхностями продолжает возрастать. Важно отметить еще одно обстоятельство, касающееся действия внутренних напряжений в заготовке в процессе ее распиливания. По мере увеличения глубины распила эти напряжения стремятся сжать пропиленные участки, вызывая тем самым возрастание сил, действующих нормально боковым поверхностям распиловочного диска. Отмеченные особенности приводят к проявлению ряда факторов, снижающих интенсивность распиливания, как в обычных условиях обработки, так и с ультразвуком.

С этих позиций характер зависимостей $h(t)$ можно объяснить следующим образом. В начале процесса распиливания (участок 1) в силу малой поверхности контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой и незначительными силами трения, действующими на его боковых сторонах, в зоне резания на обрабатываемый материал со стороны алмазных частиц действуют значительные контактные напряжения, приводящие к его интенсивному разрушению. По мере заглубления распиловочного диска в заготовку происходит снижение уровня контактных напряжений, действующих на обрабатываемый материал со стороны торцевой поверхности диска, что вызывает снижение интенсивности распиливания, обуславливая появление на зависимости $h(t)$ второго участка. Это объясняется, во-первых, возрастанием поверхности контакта торцевой поверхности диска с заготовкой, а, во-вторых, значительным увеличением сил трения, действующих по площадкам контакта его боковых поверхностей с пропиленной поверхностью заготовки. В результате, за счет этих по существу заклинивающих сил, обусловленных действием внутренних напряжений в заготовке, уменьшается значение фактической статической нагрузки, действующей в зоне резания, то есть она частично гасится силами трения, действующими по боковым сторонам распиловочного диска с обрабатываемым материалом. Это приводит к соответствующему снижению уровня контактных напряжений в зонах взаимодействия алмазных зерен с обрабатываемым материалом, что, в конечном итоге вызывает снижение интенсивности его разрушения. Наступление третьего этапа, на котором интенсивность распиливания несколько возрастает, связано со следующими обстоятельствами. После пропиливания половины заготовки площадь ее контакта с торцевой поверхностью диска начинает уменьшаться, что, казалось бы, должно приводить к возрастанию интенсивности распиливания за счет увеличения контактных напряжений. Однако этого не наблюдается в силу того, что по мере увеличения глубины пропила, во-первых, возрастает площадь контакта боковых поверхностей диска с обрабатываемым материалом, а, во-вторых, это сопровождается увеличением сил прижима этих поверхностей за счет повышения действия внутренних напряжений. В результате действия этих факторов существенно возрастают силы трения между боковыми поверхностями распиловочного диска и обрабатываемым материалом.

При определенной глубине распила, которая в условиях проводимых экспериментов составила 6–6,5 мм (при полной глубине 7 мм), действие внутренних напряжений начинает снижаться, что сопровождается падением сил трения, действующих на боковых поверхностях распиловочного диска с обрабатываемым материалом. В результате снижается обусловленная этими силами степень снижения статической нагрузки. Ее значение несколько возрастает, соответственно, повышается уровень контактных напряжений, действующих со стороны торцевой поверхности на обрабатываемый материал, что, в конечном итоге, обуславливает увеличение интенсивности распиливания на третьем участке (участке разделения заготовки) зависимости $h(t)$.

В условиях распиливания с ультразвуком по мере заглубления диска в заготовку и возрастания сил трения на его боковых сторонах изменяется режим работы акустической колебательной системы за счет повышения степени ее демпфирования. Это, как было показано в разделе 1.2, приводит к снижению интенсивности виброударного режима работы акустической колебательной системы, а, соответственно, к снижению величины импульса силы, действующей в момент контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемым материалом, в результате чего интенсивность его разрушения падает.

Более наглядно эта ситуация иллюстрируется зависимостями η_t , от времени распиливания при различных статических нагрузках (рис. 2.28). Видно, что максимальное влияние на повышение интенсивности распиливания ультразвук оказывает в начале распиливания, а по мере заглубления диска в заготовку значение η_t , существенно снижается, хотя на заключительной стадии (разделения) обработки оно вновь возрастает. С увеличением статической нагрузки ($P_{ст}$) интенсивность распиливания, как в обычных условиях обработки, так и с ультразвуком повышается.

Применительно к обработке в обычных условиях это объясняется соответствующим возрастанием давления в зоне контакта торцевой поверхности распиловочного диска с заготовкой, что приводит к увеличению глубины внедрения алмазных зерен в ее материал и, соответственно, к повышению количества материала, удаляемого с заготовки в единицу времени.

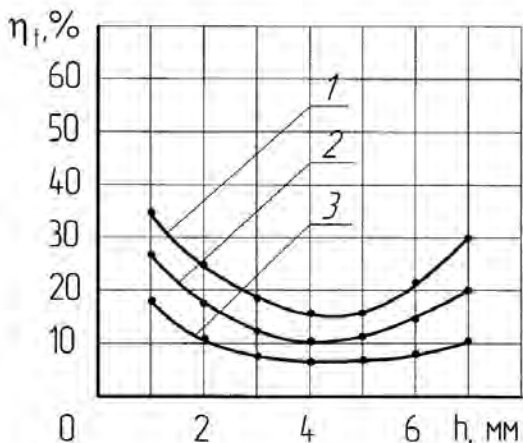


Рис. 2.28. Зависимость коэффициента эффективности воздействия ультразвука на повышение производительности обработки от глубины пропила ($A_0 = 4$ мкм; $V_0 = 7,9$ м/с) при различных значениях статической нагрузки: 1 – $P_{ст} = 0,45$ Н; 2 – $P_{ст} = 0,6$ Н; 3 – $P_{ст} = 1,0$ Н

При распиливании с ультразвуком увеличение $P_{ст}$, как следует из формулы (2.17) приводит к возрастанию значения импульса силы, действующего в момент контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемым материалом, что также интенсифицирует процесс его разрушения.

Следует отметить, что с повышением статической нагрузки степень влияния ультразвука на увеличение интенсивности распиливания несколько снижается, как показано на рис. 2.28. Связано это с тем, что для акустической колебательной системы значение $P_{ст}$ определяет величину ее предварительного натяга $x_{ст}$. При этом для реализации виброударного (нелинейного) режима работы ее звеньев (заготовка - распиловочный диск) необходимо, чтобы выдерживалось неравенство $A_0 > 2x_{ст}$. Поэтому при неизменной интенсивности возбуждения акустической системы, что имело место в экспериментах, с увеличением статической нагрузки возрастает величина предварительного натяга в ней, что сопровождается снижением уровня виброударного режима ее работы, приводящего к снижению интенсифицирующего влияния ультразвука на производительность распиливания.

Важным технологическим параметром процесса механического распиливания является скорость резания (окружная скорость торцевой поверхности диска). На рис. 2.29 приведены зависимости глубины резания от времени обработки при различных скоростях резания при распиливании в обычных условиях и с ультразвуком. В этой серии экспериментов статическая нагрузка была постоянной и составляла 0,6 Н, а параметры ультразвука соответствовали значениям в предыдущей серии.

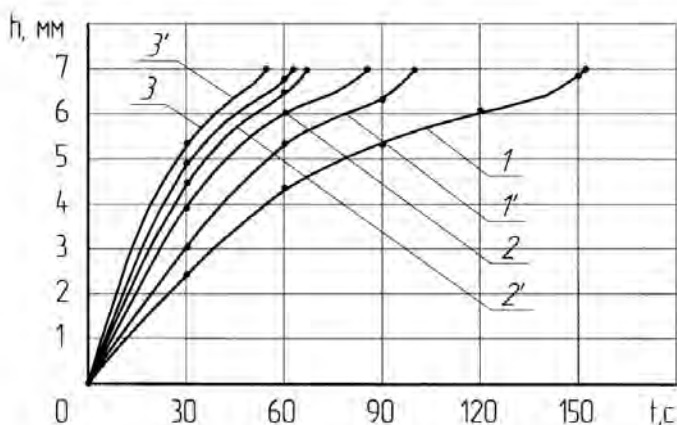


Рис. 2.29. Зависимость глубины пропила от времени обработки при различных значениях скорости резания ($P_{ст} = 0,6$ Н, $A_0 = 4$ мкм): 1 и 1' — соответственно без ультразвуковых колебаний и с ультразвуковыми колебаниями, $V_0 = 5,5$ м/с; и 2' — тоже, $V_0 = 7,9$ м/с; 3 и 3' — тоже, $V_0 = 8,8$ м/с

Из анализа полученных зависимостей видно, что как при обработке в обычных условиях, так и с ультразвуком с увеличением скорости резания интенсивность распиливания возрастает. При этом в исследованном диапазоне скоростей введение в зону обработки ультразвуковых колебаний интенсифицирует процесс распиливания. Вместе с тем, как следует из зависимостей, приведенных на рис. 2.30, степень интенсифицирующего влияния ультразвука на производительность распиливания с увеличением скорости резания снижается.

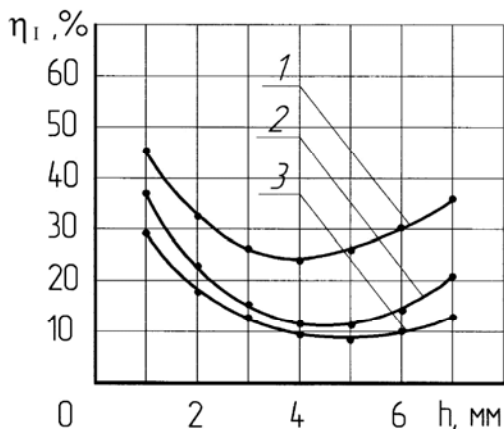


Рис. 2.30. Зависимость коэффициента эффективности воздействия ультразвука на повышение производительности обработки от глубины пропила ($P_{ст} = 0,6$ Н, $A_0 = 4$ мкм): при различных значениях скорости резания: 1 – $V_0 = 5,5$ м/с; 2 – $V_0 = 7,9$ м/с; 3 – $V_0 = 8,8$ м/с

Повышение интенсивности распиливания с увеличением скорости резания, как в обычных условиях обработки, так и с ультразвуком объясняется соответствующим возрастанием пути воздействия алмазных зерен по обрабатываемой поверхности за фиксированное время обработки, а, точнее, увеличением мощности резания.

Падение эффективности влияния ультразвука на повышение интенсивности распиливания с увеличением скорости резания связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, как было показано ранее и в соответствии с данными работ [19], увеличение скорости относительного перемещения поверхностей, взаимодействующих в виброударном режиме, приводит к возрастанию величины натяга (скоростное демпфирование) в колебательной системе, обуславливая тем самым снижение импульса силы, действующего в момент контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой и, как следствие, уменьшение интенсивности распиливания. Второе обстоятельство также связано с демпфированием акустической колебательной системы, но обусловленное силами трения, действующими на боковых сторонах диска. Дело в том, что при распиливании с ультразвуком между боковыми поверхностями диска и заготовкой действуют ультразвуковые колебания, направленные

параллельно поверхности их контакта и перпендикулярно вектору скорости скольжения. Это приводит к снижению величины сил трения, действующих в зонах скользящего контакта. Причем степень снижения определяется отношением амплитуды колебательной скорости $V_{ак}$ и скорости скольжения $V_0(V_{ак} / V_0)$. Чем это отношение меньше, тем меньше степень влияния ультразвука на снижение сил трения. Поэтому при одинаковой глубине врезания диска в заготовку степень демпфирования акустической системы колебательной системы, обусловленная силами трения, действующими на боковых поверхностях диска, будет зависеть от скорости относительного скольжения V_0 . Чем меньше ее значение, тем выше степень снижения сил трения под действием ультразвука и, соответственно, меньше величина демпфирования акустической колебательной системы. Поэтому по сравнению с большими скоростями скольжения, в этом случае поддерживается более высокий уровень виброударного режима работы акустической колебательной системы, а, соответственно, интенсивнее происходит разрушение материала заготовки под действием высокочастотных импульсных нагрузок.

Помимо статической нагрузки и скорости резания при распиливании с ультразвуком важным технологическим параметром является его интенсивность, которая определяет режим работы акустической колебательной системы, а также кинематические и динамические условия взаимодействия диска с обрабатываемой заготовкой.

Влияние амплитуды ультразвуковых колебаний на зависимость $h(t)$ отражают данные, приведенные на рис. 2.31. Из них следует, что по мере увеличения амплитуды колебаний производительность распиливания пропорционально возрастает. При этом, как и в предыдущих случаях, сам характер зависимостей $h(t)$ практически не изменяется, т. е. они имеют три вышеназванных участка. Кроме того, сохраняется закономерность изменения и коэффициента η_t , по глубине распиливания (рис. 2.32), при которой наибольшее интенсифицирующее воздействие на повышение производительности ультразвук оказывает на участке врезания, затем на линейном участке его влияние снижается, а на заключительном участке - разделения, оно вновь возрастает.

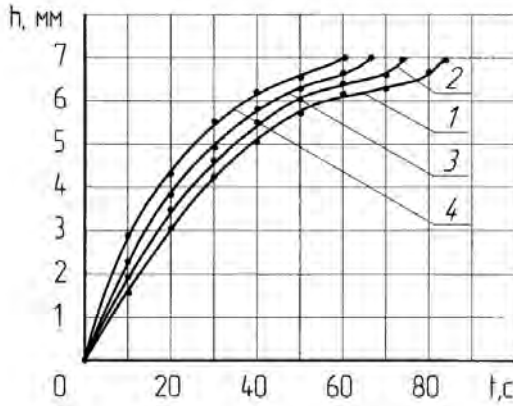


Рис. 2.31. Зависимость глубины пропила от времени обработки ($P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с) при различных значениях амплитуды колебаний: 1 – $A_0 = 0$ мкм; 2 – $A_0 = 2$ мкм; 3 – $A_0 = 4$ мкм; 4 – $A_0 = 7$ мкм

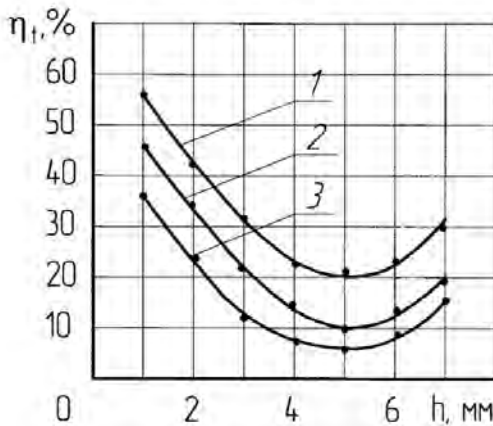


Рис. 2.32. Зависимость коэффициента эффективности воздействия ультразвука на повышение производительности обработки от глубины пропила ($P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с) при различных значениях амплитуды колебаний: 1 – $A_0 = 2$ мкм; 2 – $A_0 = 4$ мкм; 3 – $A_0 = 7$ мкм

Увеличение производительности распиливания с повышением амплитуды ультразвуковых колебаний связано с возрастанием импульса силы, действующей в момент контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемым материалом, т.е. с увеличением нера-

венства $A_0 > 2x_{ст}$. В результате количество материала, удаляемого с поверхности заготовки за время контактного взаимодействия с инструментом, возрастает, что полностью согласуется с положениями теоретических исследований, приведенными в разделе 2.1.3.

С практической точки зрения важно оценить влияние ультразвука на производительность выполнения всей операции распиливания. В таблице 2.1 приведены данные, отражающие значения интенсивности распиливания ($\text{мм}^2/\text{с}$) образцов при различных режимах обработки.

Таблица 2.1 – Интенсивность распиливания ($\text{мм}^2/\text{с}$) заготовок при различных режимах обработки

Режимы распиливания	Статическая нагрузка, Н При $A_0 = 4$ мкм, $V_0 = 7,9$ м/с					
	0,45		0,6		1,0	
	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК
Интенсивность распиливания, $\text{мм}^2/\text{с}$	0,25	0,19	0,36	0,3	0,45	0,41
Режимы распиливания	Скорость резания, м/с При $A_0 = 4$ мкм, $P_{ст} = 0,6$ Н					
	5,5		7,9		8,8	
	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК	с УЗК	без УЗК
Интенсивность распиливания, $\text{мм}^2/\text{с}$	0,21	0,16	0,36	0,3	0,46	0,41
Режимы распиливания	Амплитуда УЗК, мкм При $P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с					
	0	2	4	7		
Интенсивность распиливания, $\text{мм}^2/\text{с}$	0,3	0,33	0,36	0,41		

Из их анализа видно, что в исследованном диапазоне изменения статической нагрузки, скорости резания и амплитуды колебаний введение в зону обработки ультразвука повышает по сравнению с

традиционным распиливанием производительность выполнения операции.

В таблице 2.2 представлены данные, характеризующие повышение производительности распиливания за счет ультразвукового воздействия, выраженное в процентах по сравнению к обработке в обычных условиях.

Таблица 2.2 – Повышение производительности ультразвукового распиливания при различных режимах обработки

Режимы распиливания	Статическая нагрузка, Н При $A_0 = 4$ мкм, $V_0 = 7,9$ м/с		
	0,45	0,6	1,0
Повышение интенсивности распиливания, %	31,6	20	9,7
Режимы распиливания	Скорость резания, м/с При $A_0 = 4$ мкм, $P_{ст} = 0,6$ Н		
	5,5	7,9	8,8
Повышение интенсивности распиливания, %	31,2	20	12,2
Режимы распиливания	Амплитуда УЗК, мкм При $P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с		
	2	4	7
Повышение интенсивности распиливания, %	10	20	36,6

Анализ этих данных свидетельствует о том, что за счет ультразвукового воздействия можно в значительной мере повысить производительность распиливания хрупких материалов. Основным фактором, определяющим степень интенсифицирующего воздействия ультразвука, является уровень виброударного режима работы акустической колебательной системы. С точки зрения механизма разрушения он определяет величину импульса силы, действующей на обрабатываемый материал со стороны торцевой поверхности распиловочного диска.

В свою очередь, этот импульс определяет количество удаляемого с поверхности заготовки материала за время ее контакта с алмазными зернами, находящимися на торцевой поверхности диска. С этих позиций влияние параметров, характеризующих режимы распиливания: статическая нагрузка, скорость резания необходимо, в

первую очередь, оценивать с точки зрения их влияния на режим работы акустической колебательной системы. Так с увеличением статической нагрузки возрастает величина предварительного натяга ($x_{ст}$) в колебательной системе, а с повышением скорости резания - скоростного натяга (x_v), что при неизменной интенсивности ее возбуждения снижает уровень виброударного взаимодействия ее звеньев - торцевая поверхность диска - заготовка. Как следствие это сопровождается снижением величины импульса сил, действующих в зоне резания, а, соответственно, уменьшением интенсивности разрушения материала заготовки.

2.3.2. Влияние ультразвуковых колебаний на снижение сил сопротивления в процессе распиливания

Важным параметром процесса механического распиливания является величина и характер изменения сил сопротивления, действующих в зоне обработки, которые, в первую очередь, определяют энергетический и тепловой режимы процесса распиливания. Как указывалось в разделе 1.2, эти силы сопротивления представляют собой сумму сил резания и трения, возникающих между торцевой поверхностью диска и обрабатываемым материалом, а также сил трения, действующих по площадкам контакта боковых поверхностей диска с поверхностью уже пропиленной заготовки. Причем по мере заглубления распиловочного диска в заготовку соотношение между этими составляющими сил сопротивления изменяется. Основными факторами, влияющими на величину сил сопротивления при распиливании в традиционных условиях, являются статистическая нагрузка $P_{ст}$ и скорость резания V_0 .

При распиливании с ультразвуком, когда колебания сообщаются заготовке в направлении перпендикулярном торцевой поверхности распиловочного диска, механизм их влияния на снижение указанных составляющих сил сопротивления будет различным. Так, для торцевой поверхности диска колебания действуют в направлении перпендикулярном как ей, так и вектору скорости резания V_0 на режущей кромке диска. В то же время относительно боковых его поверхностей колебания направлены параллельно площадкам контакта с обрабатываемой заготовкой и перпендикулярно вектору скоро-

сти резания, величина которой в пределах радиуса диска, контактирующего с поверхностью заготовки, изменяется.

Для количественной оценки степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления (резания плюс трения) использовалось следующее соотношение

$$\eta_F = \frac{F_{c\text{ ст}} - F_{c\text{ ак}}}{F_{c\text{ ст}}} \cdot 100\%, \quad (2.48)$$

где $F_{c\text{ ак}}$ и $F_{c\text{ ст}}$ – соответственно значения сил сопротивления в обычных условиях распиливания и с ультразвуком.

На рис. 2.33 приведены экспериментальные зависимости изменения сил сопротивления F_c от глубины распила h для различных скоростей резания при обработке в обычных условиях и с ультразвуком ($P_{cт} = 0,6\text{ Н}$, $A_0 = 4\text{ мкм}$).

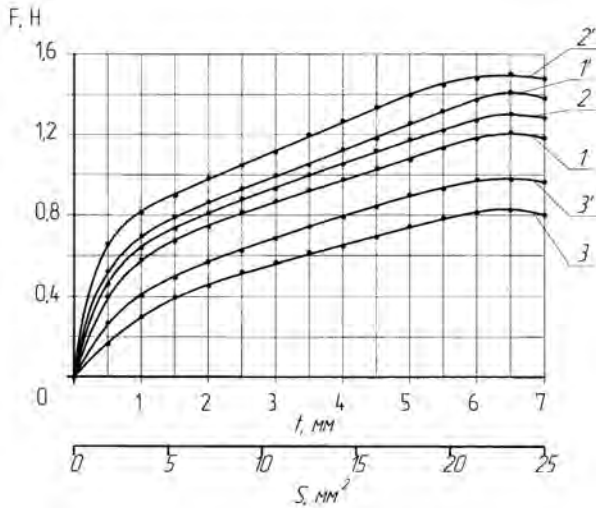


Рис. 2.33. Зависимость сил сопротивления при распиливании от глубины резания при различных скоростях резания ($P_{cт} = 0,6\text{ Н}$, $A_0 = 4\text{ мкм}$): 1 и 1' – соответственно с ультразвуковыми колебаниями и без ультразвуковых колебаний, 7,9 м/с; 2 и 2' – 8,8 м/с; 3 и 3' – 5,5 м/с

Для второго участка, который назовем участком установившегося распиливания, характерно, во-первых, снижение темпа нарастания сил сопротивления по мере увеличения глубины распила, а, во-вторых, зависимость $F_c(h)$ носит практически линейный характер. На третьем участке, который назовем участком разделения, происходит некоторое снижение сил сопротивления вплоть до окончательного распиливания заготовки.

С увеличением скорости резания величина сил сопротивления во всех случаях распиливания возрастает, при этом граница первого участка (участка врезания) смещается в сторону меньших значений h , в то время как граница наступления третьего участка (участка разделения) практически не изменяется.

По сравнению с распиливанием в обычных условиях введение в зону обработки ультразвуковых колебаний приводит при прочих равных условиях к снижению значения сил сопротивления, при этом сам характер зависимостей $F_c(h)$ остается практически без изменений. Степень влияния ультразвука на снижение сил сопротивления η_F от глубины распиливания при различных скоростях резания отражают зависимости, приведенные на рис. 2.34.

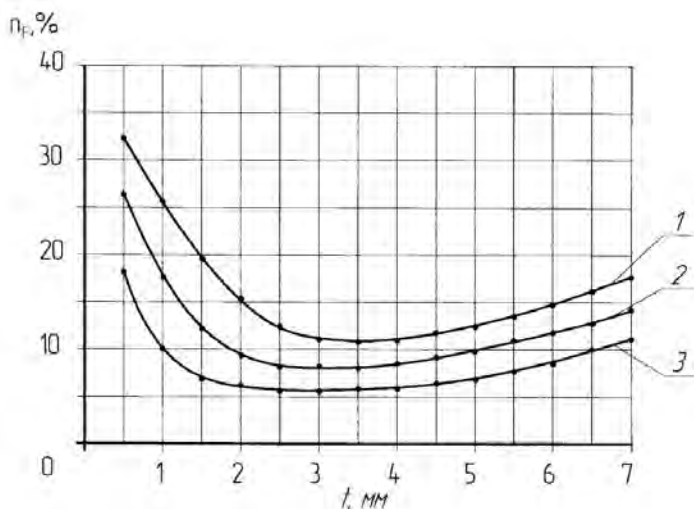


Рис. 2.34. Зависимость степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления от скорости резания: 1 — 7,9 м/с; 2 — 8,8 м/с; 3 — 5,5 м/с

Характерно, что эти зависимости имеют точки перегиба, соответствующие определенной глубине врезания. В начале распиливания по мере увеличения глубины резания h значение параметра η_f довольно интенсивно снижается, достигая при определенной глубине резания своего максимального значения. После этого степень влияния ультразвука на снижение сил сопротивления начинает возрастать вплоть до окончательного разделения заготовки. При этом с увеличением скорости резания значение η_f снижается, а значение глубины врезания диска, соответствующее минимальной степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления смещается в сторону меньших значений h .

Важным технологическим параметром при механическом распиливании кристаллов алмаза является статическая нагрузка $P_{ст}$. От ее величины зависят силы сопротивления, интенсивность распиливания, качество площадок распиленных полуфабрикатов и наличие на них дефектов. В традиционных условиях распиливания предельное значение статической нагрузки на кристалл ограничивается условием потери устойчивости диска распиловочного диска. Как правило, величина $P_{ст}$ не превышает 0,8–1,0 Н, при этом на выходе (на стадии разделения кристалла) для предотвращения сколов алмаза, статическую нагрузку снижают до минимальной величины.

На рис. 2.35 представлены экспериментальные зависимости изменения сил сопротивления в процессе распиливания образцов для различных значений статической нагрузки при обработке в обычных условиях и с ультразвуком ($V_0 = 7,9$ м/с, $A_0 = 4$ мкм). Эти зависимости имеют такой же характер, как и представленные на рис. 2.33. С увеличением статической нагрузки величина сил сопротивления во всех случаях возрастает. Однако при прочих равных условиях ее значение при распиливании с ультразвуком остается меньше, чем при обработке в обычных условиях.

Изменение степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления при распиливании образцов с различной статической нагрузкой отражают зависимости, приведенные на рис. 2.36. Из них видно, что с увеличением $P_{ст}$ значение η_f уменьшается, хотя характер зависимости $\eta_f(h)$ остается практически неизменным. Единственное отличие состоит в том, что с увеличением статической нагрузки точка перегиба кривых, соответствующая минимальному

значению η_F смещается в сторону меньших значений врезания диска h .

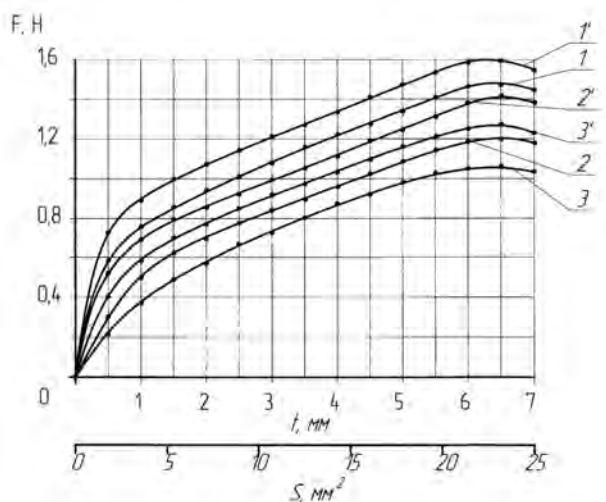


Рис. 2.35. Зависимость сил сопротивления при распиливании от глубины резания при различных статической нагрузки ($A_0 = 4$ мкм): 1 и 1' – соответственно с УЗК и без УЗК ($P_{ст} = 1,0$ Н); 2 и 2' – $P_{ст} = 0,6$ Н; 3 и 3' – $P_{ст} = 0,45$ Н

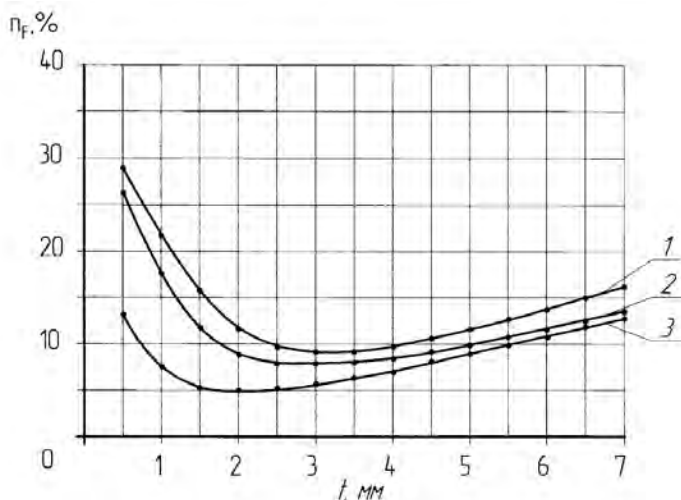


Рис. 2.36. Зависимость степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления от статической нагрузки: 1 – 0,45 Н; 2 – 0,6 Н; 3 – 1,0 Н

Характер изменения сил сопротивления в процессе распиливания образцов при различных значениях амплитуды колебаний отражают зависимости, приведенные на рис. 2.37 ($P_{ст} = 0,6 \text{ Н}$, $V_0 = 7,9 \text{ м/с}$).

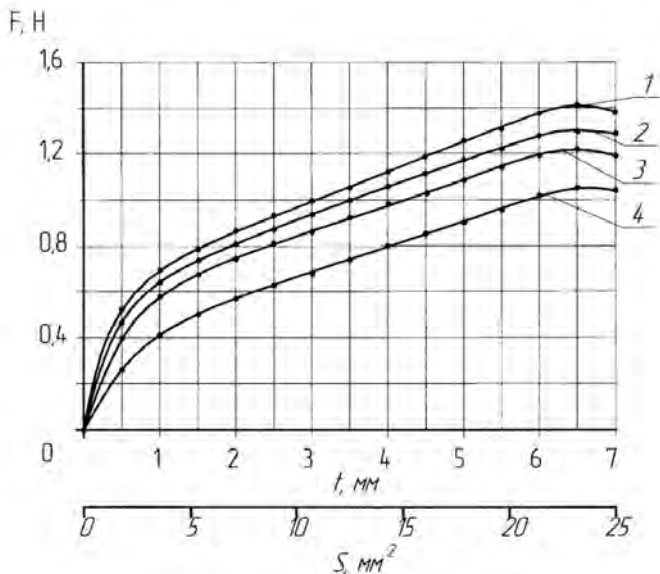


Рис. 2.37. Зависимость сил сопротивления при распиливании от глубины резания при различных амплитудах колебаний ($V = 7,9 \text{ м/с}$; $P_{ст} = 0,6 \text{ Н}$):
 1 – без УЗК; 2 – с УЗК ($A_0 = 2 \text{ мкм}$); 3 – с УЗК ($A_0 = 4 \text{ мкм}$); 4 – с УЗК ($A_0 = 7 \text{ мкм}$)

Отсюда видно, что с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний величина сил сопротивления снижается. Степень их снижения в процессе распиливания с ультразвуком различной интенсивности отражают зависимости, приведенные на рис. 2.38.

Из анализа этих данных видно, что с увеличением амплитуды вводимых ультразвуковых колебаний величина сил сопротивления в процессе распиливания снижается. При этом характер зависимости $\eta_F(h)$ практически остается неизменным с тем только отличием, что по мере увеличения A_0 значение η_F , соответствующее минимальной степени воздействия ультразвука смещается в сторону меньших значений глубины врезания диска в заготовку.

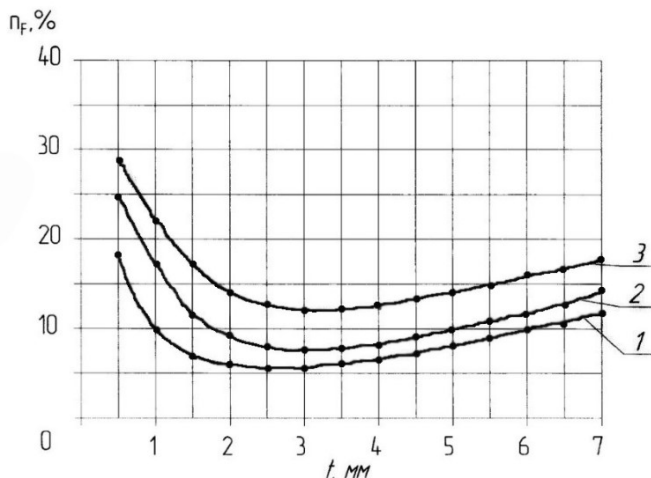


Рис. 2.38. Зависимость степени влияния ультразвука на снижение сил сопротивления от амплитуды колебаний: 1 – 2 мкм; 2 – 4 мкм; 3 – 7 мкм

Таким образом, полученные экспериментальные зависимости полностью подтверждают положения теоретических исследований о механизме влияния ультразвука на величину сил сопротивления в процессе распиливания, изложенные в разделе 1.2.

2.3.3. Влияние ультразвуковых колебаний на шероховатость поверхности площадок распиленных заготовок

Важнейшим параметром процесса механического распиливания кристаллов алмаза является качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов. Именно состояние этих поверхностей, их шероховатость, наличие глубоких рисок и дефектов, является доминирующим фактором, определяющим выход годного дорогостоящего сырья после распиливания и подшлифовки площадок распиленных полуфабрикатов. С этих позиций принципиально важным является обеспечить в процессе механического распиливания с ультразвуком высокое качество этих поверхностей и, в первую очередь, минимальное значение их шероховатости.

В результате выполненного комплекса сравнительных экспериментальных исследований по распиливанию образцов в обычных

условиях и с ультразвуком получены данные, отражающие влияние технологических ($P_{ст}$, V_0) и акустических (A_0) параметров процесса на шероховатость их площадок, в частности, на значение параметра R_z .

Переходя к анализу полученных данных, необходимо отметить общую закономерность в формировании шероховатости поверхности по площадкам распиленных образцов. Как отмечалось в разделе 2.1.5, она заключается в том, что высота микронеровностей (R_z) не остается величиной постоянной, а возрастает с увеличением глубины пропила h , как показано на рис. 2.39 ($P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с).

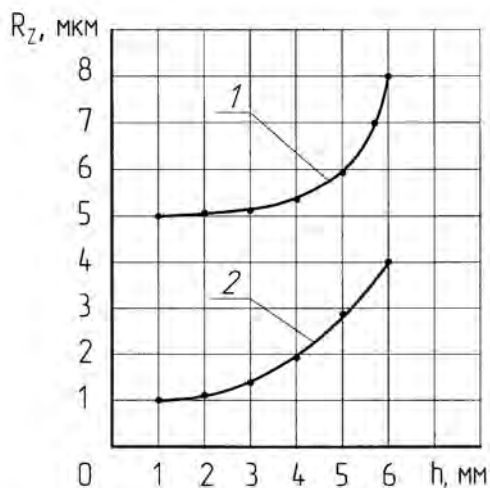


Рис. 2.39. Зависимость параметра R_z шероховатости поверхности распиленной заготовки от глубины пропила ($P_{ст} = 0,6$ Н; $V_0 = 7,9$ м/с; $A_0 = 4$ мкм):
1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Такое положение объясняется тем, что окончательное формирование шероховатости поверхности площадок происходит за счет их изнашивания (истирания) о боковые поверхности распиловочного диска. В результате этого происходит сглаживание (затираение) микронеровностей и тем самым достигается эффект полирования площадок пропиленной заготовки. По этой причине участки площадок, расположенные в начале распиливания более длительное время подвергаются истиранию о боковые поверхности диска, чем

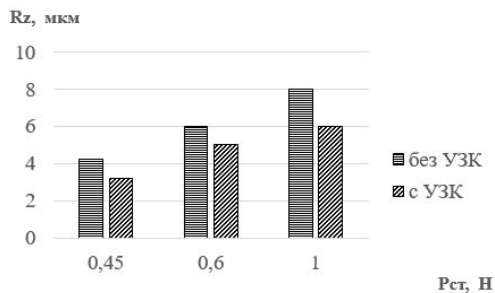
участки, находящиеся в конце пропила. В результате высота микронеровностей поверхности площадок возрастает по мере увеличения глубины распиливания.

Введение в зону обработки ультразвуковых колебаний (рис. 2.39, кривая 2) приводит к снижению значения параметра Rz , но при этом характер зависимости $Rz(h)$ остается таким же, как и при распиливании в обычных условиях. Эффект снижения высоты микронеровностей поверхности площадок под действием ультразвука объясняется следующим образом. Сообщение заготовке ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно торцевой поверхности диска обуславливает возникновение в зонах ее контакта с боковой поверхностью инструмента дополнительных высокочастотных касательных микросмещений, действующих параллельно пропиленным площадкам и перпендикулярно вектору скорости резания. В результате этого происходит, во-первых, изменение направления силы трения, действующей по площадкам контакта, что обуславливает изменение направления и величины касательных напряжений, возникающих в контакте, а, во-вторых, возрастает величина проскальзывания контактирующих поверхностей за счет повышения пути трения.

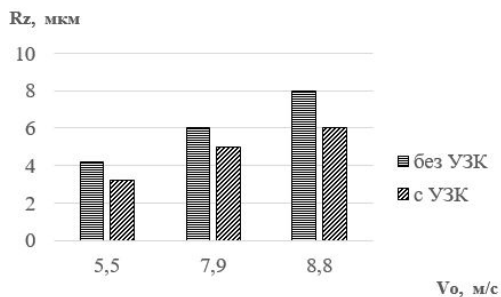
Комплексное действие этих факторов приводит к интенсификации процесса изнашивания поверхности площадки пропиленной заготовки, что сопровождается активным разрушением и сглаживанием имеющихся на ней микронеровностей и тем самым обеспечивается более выраженный в сравнении с обычным процессом полирующий эффект.

Влияние статической нагрузки, скорости резания и амплитуды ультразвуковых колебаний на значение высоты микронеровностей площадок распиленных заготовок отражают данные, представленные на рис. 2.40. В этом случае приведены средние арифметические значения параметра Rz , полученные по результатам измерений в трех по длине пропила участках.

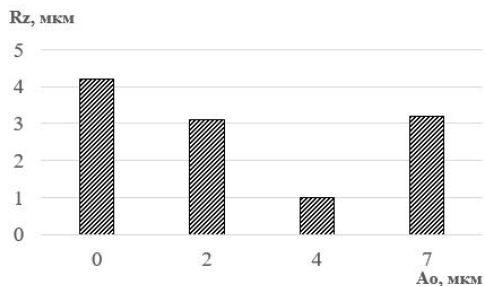
Из полученных экспериментальных данных (рис. 2.40, а) видно, что с увеличением статической нагрузки значение параметра Rz , как при распиливании в обычных условиях, так и с ультразвуком возрастает, но в последнем случае его значение остается ниже в среднем на 20-25 %.



а



б



в

Рис. 2.40. Зависимость параметра Rz шероховатости распиленной поверхности образцов от: а – статической нагрузки ($V_0 = 7,9$ м/с; $A_0 = 4$ мкм); б – скорости резания ($P_{ст} = 0,6$ Н; $A_0 = 4$ мкм); в – амплитуды колебаний ($P_{ст} = 0,6$ Н; $V_0 = 7,9$ м/с) при обработке в обычных условиях и с ультразвуком

Рост высоты микронеровностей с повышением статической нагрузки связан с возрастанием давления в зоне контакта торцевой поверхности диска с заготовкой, что вызывает увеличение глубины

воздействия алмазных зерен на обрабатываемый материал, обуславливая тем самым увеличение шероховатости его поверхности. При этом следует подчеркнуть, что доминирующее влияние на формирование шероховатости поверхности пропиленной заготовки оказывают условия разрушения ее материала в зонах контакта по краям торцевой поверхности распиловочного диска.

Повышение статической нагрузки при распиливании с ультразвуком также приводит к возрастанию параметра R_z , что связано с увеличением импульса силы, действующей в момент контакта торцевой поверхности диска с заготовкой, вызывая большую глубину внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал, а, соответственно, и большую зону его разрушения, что приводит к повышению шероховатости поверхности. Вместе с тем, по сравнению с традиционным процессом при распиливании с ультразвуком, благодаря интенсификации эффекта полирования, высота микронеровностей поверхности площадок распиленных заготовок оказывается меньше.

С увеличением скорости резания (рис. 2.40, б) значение параметра R_z поверхности площадок, как в обычных условиях обработки, так и при ультразвуковом воздействии уменьшается. Для условий традиционной обработки такая закономерность объясняется в основном двумя причинами. Во-первых, с увеличением скорости резания сокращается время воздействия единичного алмазного зерна на обрабатываемый материал со стороны торцевой поверхности распиловочного диска, что приводит к уменьшению глубины его разрушения и, как следствие, к снижению шероховатости поверхности заготовки в зоне распиливания. Во-вторых, за счет возрастания скорости скольжения боковой поверхности диска относительно пропиленной поверхности заготовки в большей степени проявляется эффект ее полирования, обуславливающий снижение на ней высоты микронеровностей.

Аналогичный характер зависимости $R_z(V_0)$ сохраняется при распиливании заготовок с ультразвуком, то есть с увеличением V_0 высота микронеровностей на поверхности распиленных заготовок снижается, оставаясь при этом ниже, чем при обработке без ультразвука. Вместе с тем, по мере увеличения скорости резания степень влияния колебаний на снижение высоты микронеровностей поверхности площадок распиленных заготовок снижается.

Для объяснения этих зависимостей проанализируем влияние ультразвука по процесс формирования микронеровностей в процессе распиливания. По аналогии с обработкой в обычных условиях, рассмотрим два основных фактора, ответственных за значение параметра Rz поверхности площадок распиленной заготовки. Так с увеличением скорости резания продолжительность динамического воздействия единичного алмазного зерна на элементарную площадку обрабатываемой поверхности в момент контакта торцевой поверхности диска снижается, вызывая уменьшение глубины ее разрушения и, соответственно, значение параметра Rz. При этом благодаря высокочастотному дискретному взаимодействию контактирующих поверхностей высота микронеровностей, формируемых на поверхности заготовки в зоне резания оказывается меньше, чем при распиливании в обычных условиях. Вторым фактором, ответственным за окончательное формирование шероховатости поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, является процесс их изнашивания в результате трения скольжения о боковые поверхности распиловочного диска. Как уже отмечалось, при обработке с ультразвуком на площадках контакта заготовки с боковыми поверхностями распиловочного диска помимо относительного скольжения поверхностей, обусловленного скоростью резания, происходит их дополнительное колебательное смещение с амплитудой A_0 в направлении перпендикулярном вектору V_0 . За счет этого интенсифицируется процесс изнашивания поверхностей пропиленной заготовки, который вызывает уменьшение на них высоты микронеровностей. В свою очередь, степень интенсифицирующего влияния этих колебаний на износ контактирующих поверхностей при прочих равных условиях определяется соотношением амплитуды колебательной скорости $V_{ак}$ и скорости V_0 . При этом, чем больше отношение $V_{ак}/V_0$, тем выше степень влияния ультразвука на интенсивность изнашивания контактирующих поверхностей. С этих позиций можно объяснить изменение степени снижения параметра Rz за счет ультразвукового воздействия при различных скоростях резания. Так при постоянном значении амплитуды колебаний с увеличением скорости резания V_0 отношение $V_{ак}/V_0$ уменьшается, а, следовательно, снижается интенсифицирующее влияние ультразвука на процесс изнашивания контактирующих поверхностей. В результате этого, по мере увеличения скорости резания разница меж-

ду высотой микронеровностей площадок заготовок, распиленных в обычных условиях и с ультразвуком, уменьшается.

Влияние амплитуды ультразвуковых колебаний на значение параметра Rz поверхности распиленных заготовок ($P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с), отражают данные, приведенные на рис. 1.42. Их анализ показывает, что по мере увеличения A_0 вначале происходит снижение параметра Rz , который достигает свое минимальное значение при амплитудах колебаний порядка 3–5 мкм. При распиливании с большими значениями A_0 высота микронеровностей поверхности площадок начинает возрастать, хотя значение параметра Rz остается ниже, чем при обработке в обычных условиях. Такая ситуация объясняется следующими обстоятельствами. При малых значениях амплитуды ультразвуковых колебаний, ($A_0 = 3–5$ мкм) уровень виброударного режима работы акустической колебательной системы относительно невысокий и для него остаются справедливыми выше отмеченные положения, касающиеся влияния ультразвука на высоту микронеровностей поверхности площадок распиленных заготовок. В случае большой интенсивности возбуждения акустической системы ($A_0 = 7$ мкм) в ней помимо ультразвуковых, возбуждались и низкочастотные колебания. Именно действие в системе распиловочный диск - заготовка этих низкочастотных колебаний обуславливает возрастание высоты микронеровностей поверхности площадок распиленных заготовок. Дело в том, что, накладываясь на ультразвуковые, они вызывают возникновение в зоне резания колебательных смещений в широком амплитудно-частотном диапазоне, действующих в различных направлениях. В результате этого в момент контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой при совместном действии как ультразвуковых, так и низкочастотных колебаний действуют значительные динамические силы, вызывающие интенсивное разрушение поверхности, что приводит к возрастанию на ней величины микронеровностей. Последующее их сглаживание в процессе трения распиленной поверхности о боковую поверхность диска, несмотря на возрастание $V_{ар}/V_0$, происходит менее интенсивно, чем при распиливании с малым уровнем возбуждения акустической колебательной системы. Связано это с тем, что присутствие низкочастотных колебаний значительной амплитуды приводит к изменению характера изнашивания трущихся поверхностей.

2.3.4. Влияние ультразвука на температурный режим процесса распиливания

Тепловые процессы, происходящие при механическом распиливании кристаллов алмаза, в значительной мере влияют на механизм изнашивания алмаза, а, следовательно, на производительность обработки и качество площадок распиленных полуфабрикатов. Так сторонники термохимического механизма изнашивания алмаза при его обработке [105–107] считают, что она обусловлена сгоранием алмаза, либо превращением в графит или аморфный углерод под действием высокой температуры в месте контакта. Согласно их точки зрения при низкой скорости обработки алмаза процесс его разрушения происходит за счет образования трещин на поверхности, а при высоких скоростях, когда в зоне контакта алмазного зерна с обрабатываемой поверхностью возникают локальные точки с температурой выше имеет место графитизация алмаза в виде отдельных ядер графита, которые затем удаляются в процессе обработки.

Основными источниками теплоты в процессе механического распиливания кристаллов алмаза является работа сил резания и трения торцевой поверхности распиловочного диска с обрабатываемым материалом, а также работа сил трения его боковых поверхностей с поверхностями пропиленной части заготовки. При распиливании с ультразвуком помимо указанных, действуют источники теплоты, обусловленные диссипацией акустической энергии в заготовке, которой сообщаются колебания, а также на границе ее взаимодействия с распиловочным диском. Поэтому конечное состояние теплового режима в процессе распиливания будет определяться комплексным влиянием всех этих источников тепла, степень проявления которых будет определяться режимами обработки.

Примененная в исследованиях методика измерения температуры позволяла оценивать ее значение вблизи зоны резания по глубине распила заготовки. На рис. 2.41 приведены зависимости изменения температуры в зоне резания от глубины распила при обработке в обычных условиях ($P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,7$ м/с) и с ультразвуком. Их анализ показывает, что в начале обработки от момента врезания диска в заготовку значение температуры интенсивно нарастает, достигая своего максимального значения при глубине распиливания

порядка 5–5,5 мм. После чего ее значение начинает постепенно снижаться вплоть до окончательного разделения заготовки. Такой вид зависимости $T(h)$ объясняется характером изменения сил резания и трения по глубине распиливания. Так в начальный период обработки (врезания) величина этих сил невелика, а по мере заглабления в заготовку их значения начинают нарастать и, в первую очередь, силы трения, действующие по площадкам контакта боковых поверхностей диска с пропиленной поверхностью заготовки.

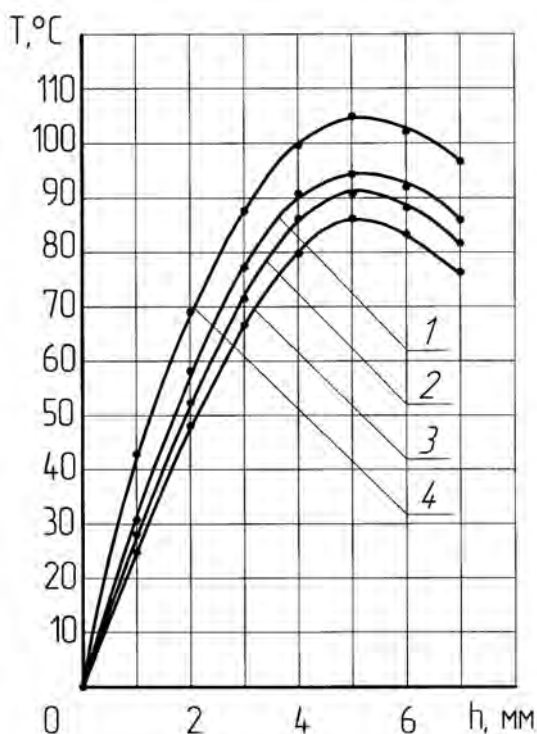


Рис. 2.41. Зависимость температуры в зоне обработки от глубины распиливания ($P_{ст} = 0,6$ Н; $V_0 = 7,9$ м/с): 1 – без УЗК; 2 – с УЗК ($A_0 = 2$ мкм); 3 – с УЗК ($A_0 = 4$ мкм); 4 – с УЗК ($A_0 = 7$ мкм)

Этой ситуации соответствует интенсивное нарастание температуры в зоне резания (первый участок на зависимости $T(h)$). Далее при достижении глубины врезания порядка 3,5–4 мм температура

начинает несколько снижаться вплоть до окончания обработки. Наличие второго - падающего участка на зависимости $T(h)$, объясняется снижением уровня действия внутренних напряжений, действующих на боковые поверхности диска со стороны пропиленной заготовки (заклинивающих сил), что обуславливает уменьшение сил трения в этих зонах и, как следствие, понижения температуры. При распиливании с ультразвуком вид зависимостей $T(h)$ имеет тот же характер, как и при обработке в обычных условиях, что свидетельствует об аналогичном влиянии на тепловой режим выше отмеченных обстоятельств. Вместе с тем при ультразвуковом воздействии дополнительным источником тепловыделения является диссипация акустической энергии, как в заготовке, так и на границе распиловочный диск - заготовка (граничная диссипация). Поэтому конечно состояние теплового режима при распиливании с ультразвуком будет определяться суммарным вкладом двух источников тепла: силами трения и резания, действующими в зоне обработки, и диссипацией акустической энергии как в ней, так и в заготовке, которой сообщаются ультразвуковые колебания.

Как известно [87], для большинства твердых тел затухание продольных и сдвиговых волн определяется формулой

$$\alpha = A_0 f + B f^4. \quad (2.49)$$

Составляющая, пропорциональная частоте f , обуславливается наличием упругого гистерезиса, а член пропорциональный f^4 , определяет релеевское (диффузионное) рассеяние энергии.

При малых амплитудах колебаний величина коэффициента α не зависит от амплитуды, а при больших амплитудах $A_0 > 10$ мкм) процесс усложняется: появляется нелинейное поглощение. При этом с увеличением A_0 коэффициент поглощения сначала медленно, а затем резко возрастает. Для большинства поликристаллов и аморфных тел в диапазоне частот 2–100 кГц коэффициент α прямо пропорционален f . С увеличением амплитуды напряжений коэффициент потерь возрастает, а при больших их значениях появляются микроскопические деформации и резко увеличиваются потери.

Исходя из отмеченных положений, проанализируем влияние ультразвука на тепловой режим процесса распиливания. Из приве-

денных на рис. 2.41 данных следует, что при обработке с ультразвуком в диапазоне малых значений амплитуд колебаний ($A_0 < 4-5$ мкм) наблюдается некоторое снижение температурного режима по сравнению с распиливаемым в обычных условиях. Это связано с тем, что при такой интенсивности колебаний диссипация акустической энергии, незначительна. Следовательно, нагрев зоны резания за счет этого фактора в общем балансе температурного режима распиливания является несущественным. Вместе с тем, при распиливании с ультразвуком взаимодействие торцевой (режущей) поверхности диска с заготовкой носит виброударный, дискретный характер, то есть имеет место прерывистое резание. В этом случае за время контакта поверхностей происходит их нагрев за счет работы сил резания и трения, а в момент отрыва - охлаждение. В результате среднее значение теплоты, выделяемое в зоне резания за период ультразвуковых колебаний, оказывается меньше, чем за тот же промежуток времени при распиливании в обычных условиях. Это происходит, несмотря даже на то, что в момент контактного (ударного) взаимодействия этих поверхностей мгновенные (импульсные) значения температуры могут превосходить значения, соответствующие традиционной обработке, когда поверхности находятся в постоянном контакте под действием статической нагрузки.

Зависимости $T(h)$ при распиливании с ультразвуком также как и при обработке в обычных условиях имеют два выраженных участка. На первом от момента врезания диска и до глубины пропила порядка 5-5,5 мм происходит возрастание теплового режима распиливания, после чего по мере увеличения h вплоть до окончательного разделения заготовки температура несколько снижается. Такой вид зависимости $T(h)$ в условиях ультразвукового воздействия обусловлен теми же причинами, что и при распиливании в обычных условиях. Отличие заключается в том, что возрастание сил трения по мере увеличения h на первом участке зависимости приводит к повышению степени демпфирования акустической колебательной системы и снижению за счет этого уровня виброударного взаимодействия ее звеньев, что сопровождается возрастанием температурного режима за счет сокращения времени отрыва поверхностей. После пропиливания заготовки на глубину, при которой действие внутренних напряжений на боковые поверхности диска (заклинивающие силы) начинает снижаться, силы трения в этих зонах падают, что

приводит к некоторому снижению температурного режима распиливания вплоть до разделения заготовки.

Иная картина наблюдается при введении в зону обработки ультразвуковых колебаний значительной амплитуды. Так, по сравнению с температурными режимами процесса распиливания в обычных условиях введение ультразвуковых колебаний амплитудой 7 мкм (кривая 4 на рис. 2.41) вызывает его повышение. В этом случае значительно возрастает в суммарном тепловом балансе доля теплоты, выделяемая за счет диссипации акустической энергии, как в зоне резания, так и в материале заготовки. В результате суммарного действия этого источника теплоты с источником, обусловленным работой сил резания и трения, температурный режим процесса распиливания с ультразвуком превышает его значение при традиционной обработке.

Влияние скорости резания, статической нагрузки и амплитуды ультразвуковых колебаний на максимальное значение температурного режима при распиливании в обычных условиях и с ультразвуком отражают данные, приведенные в таблице 2.3.

Их анализ показывает, что с увеличением скорости резания и статической нагрузки максимальное значение температуры при распиливании как в обычных условиях, так и с ультразвуком возрастает. При этом, в зависимости от значения амплитуды вводимых колебаний ультразвуковое воздействие может приводить либо к снижению температурного режима обработки, либо к его повышению.

В таблице 2.3 приведены данные, отражающие степень влияния ультразвука на изменение максимального значения температуры в процессе распиливания, выраженную в процентах по отношению к ее значению при обработке в обычных условиях. Знак «+» соответствует проценту снижения температуры за счет ультразвукового воздействия, а знак «-» – ее повышению.

Отсюда следует, что за счет ультразвукового воздействия можно существенно влиять на температурный режим процесса распиливания. При этом, основным параметром, определяющим степень этого влияния является при прочих равных условиях амплитуда вводимых в зону обработки колебаний.

Таблица 2.3 – Изменение температуры в зоне распиливания при различных режимах обработки

Режимы распиливания	Статическая нагрузка, Н При $A_0 = 4$ мкм, $V_0 = 7,9$ м/с					
	0,45		0,6		1,0	
	С УЗК	Без УЗК	С УЗК	Без УЗК	С УЗК	Без УЗК
Максимальное значение температуры, $^{\circ}\text{C}$	70,1	84,2	86,2	95,3	87,3	98,4
Степень изменения температуры под действием УЗК, %	18		17,2		11,2	
Режимы распиливания	Скорость резания, м/с При $A_0 = 4$ мкм, $P_{ст} = 0,6$ Н					
	5,5		7,9		8,8	
	С УЗК	Без УЗК	С УЗК	Без УЗК	С УЗК	Без УЗК
Максимальное значение температуры, $^{\circ}\text{C}$	68,8	80,7	86,2	95,3	99,2	108,3
Степень изменения температуры под действием УЗК, %	14,7		9,5		8,4	
Режимы распиливания	Амплитуда УЗК, мкм При $P_{ст} = 0,6$ Н, $V_0 = 7,9$ м/с					
	$A = 0$	$A = 2$	$A = 4$	$A = 7$		
Максимальное значение температуры, $^{\circ}\text{C}$	95,3	90,1	86,2	106,5		
Степень изменения температуры под действием УЗК, %	-	5,4	9,5	11,8		

В случае ее небольших значений ($A_0 = 2-4$ мкм) уровень температурного режима в процессе распиливания снижается на 18 %, а при введении колебаний с амплитудой свыше 4-5 мкм, он возрастает

ет по сравнению с температурным режимом при традиционной обработке. Так при распиливании с $A_0 = 7$ мкм это повышение составило для максимального значения температуры 11,7 %.

В свою очередь, существенное повышение температурного режима процесса распиливания, вызывает к проявлению ряда нежелательных явлений. Во-первых, интенсифицируется процесс адгезионного взаимодействия боковых поверхностей диска с пропиленной поверхностью заготовки, что вызывает, как показано в таблице 1.3, увеличение шероховатости площадок пропиленных заготовок. Во-вторых, такой характер взаимодействия приводит к возникновению в системе СПИД низкочастотных вибраций, которые отрицательно сказываются на протекании процесса распиливания.

Таким образом, с этих позиций можно считать, что рациональным диапазоном значений амплитуды вводимых ультразвуковых колебаний является $A_0 = 2-5$ мкм.

2.4. Разработка станочного оборудования для механического распиливания хрупких неметаллических материалов с ультразвуком

С целью внедрения в производство результатов проведенных исследований применительно к механическому распиливанию с ультразвуком хрупких неметаллических материалов, в частности кристаллов алмаза и других драгоценных камней необходимо было создать станочное оборудование и разработать соответствующую технологию. После этого, провести их испытания в производственных условиях, на основании которых оценить экономическую эффективность применения ультразвука и выработать рекомендации по его наиболее рациональному использованию в процессе распиливания драгоценных камней.

2.4.1. Анализ схем введения ультразвуковых колебаний и определение оптимального варианта конструкции распиловочной секции

Приступая к обоснованию конструкции распиловочной секции для механического распиливания, в частности, монокристаллов алмаза с ультразвуком, необходимо было учитывать следующие

принципиальные требования. Во-первых, принимая во внимание огромный парк существующих станков типа ШП-2, повсеместно применяемых на заводах «Кристалл», необходимо было реализовать такие конструкторские решения, которые позволили бы использовать эти станки и для распиливания с ультразвуком. Во-вторых, устройство для направленного введения колебаний в зону распиливания не должно существенным образом изменять последовательность и содержание всех тех приемов, которые выполняет рабочий-распиловщик при традиционной обработке. В-третьих, затраты времени на установку и снятие заготовки, ее закрепления и открепления, то есть вспомогательное время, не должны превышать соответствующих значений для условий распиливания без ультразвука. И, наконец, в конструкции разрабатываемого оборудования должны быть предусмотрены меры, исключающие непосредственный контакт рук рабочего с источником ультразвуковых колебаний.

С учетом обеспечения выше отмеченных требований был проведен комплекс опытно-конструкторских и исследовательских работ, включающий разработку, создание и испытание нескольких вариантов станочного оборудования для механического распиливания хрупких неметаллических материалов с ультразвуком. На основании сравнительного анализа полученных результатов был определен наиболее приемлемый вариант станочного оборудования и проведены его испытания в производственных условиях.

В первом варианте для сообщения заготовке колебательных смещений требуемого направления традиционная распиловочная секция дополнительно была оснащена акустическим узлом, который монтировался на ней, как показано на рис. 2.42, а. Пьезокерамический ультразвуковой преобразователь 1 с номинальной резонансной частотой 44 кГц с помощью фланца, выполненного в узловом сечении конического концентратора 2, закреплялся в отверстии на нижней плите 3 распиловочной секции. На выходном торце концентратора посредством резьбового соединения жестко закреплялась упругая пластина 4, на которую опирался регулировочный винт 5 стрелы 6. На рис. 2.42, б приведена фотография данного варианта распиловочной секции.

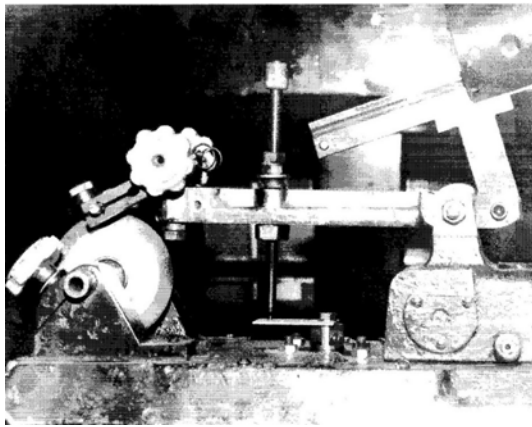
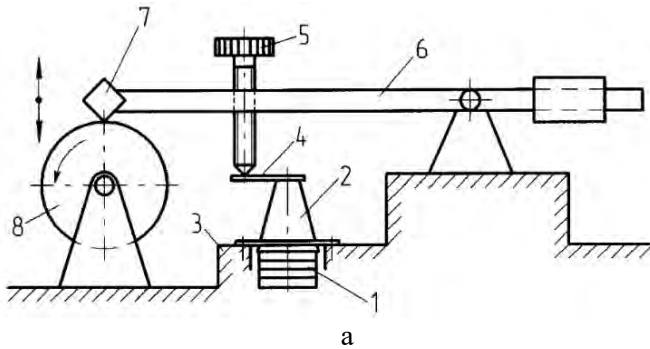


Рис. 2.42. Распиловочная секция с ультразвуковым преобразователем и упругой платиной: а – схема; б – фотография общего вида; 1 – пьезокерамический ультразвуковой преобразователь; 2 – концентратор; 3 – нижняя плита; 4 – упругая пластина; 5 – регулировочный винт; 6 – стрела

В такой акустической системе возбуждаемые в пьезокерамическом преобразователе продольные ультразвуковые колебания передавались стальной пластине, а от нее регулировочному винту и далее стреле, вызывая колебательные смещения заготовки 7 в направлении перпендикулярном торцевой поверхности распиловочного диска 8. Необходимость использования пластины 4 связана с двумя обстоятельствами. Во-первых, она обеспечивала надежное контактирование опорного винта на колеблющейся поверхности пластины

при его выворачивании по мере заглубления распиловочного диска в заготовку. Во-вторых, за счет изменения ее упругости можно целенаправленно влиять на условия контактного взаимодействия элементов разомкнутой акустической колебательной системы: пластина - опорный винт, а соответственно, на параметры колебательного смещения заготовки в процессе ее распиливания.

Проведенные испытания этого варианта распиловочной секции выявили как его достоинства, так и существенные недостатки. К первым следует отнести сравнительную простоту его реализации и сохранение неизменными всех приемов, выполняемых распиловщиком в обычных условиях обработки. Однако данному варианту присущи существенные недостатки принципиального характера, которые, в первую очередь, связаны с применением акустической колебательной системы разомкнутого типа. В этом случае параметры колебательного смещения стрелы вместе с обрабатываемой заготовкой определяются режимом виброударного взаимодействия опорного винта с колеблющейся пластиной. Как было указано, установление виброударного режима в такой системе определяется условием

$$A_0 > 2x_{ст} \text{ или } A_0 > \frac{2P_{ст}}{c}, \quad (2.50)$$

где A_0 – амплитуда ультразвуковых колебаний пластины; $x_{ст}$ – величина предварительного натяга в колебательной системе; $P_{ст}$ – величина статической нагрузки; c – жесткость пластины.

По мере увеличения неравенства (2.49) интенсивность виброударного режима возрастает, что приводит к повышению амплитуды колебательных смещений стрелы с закрепленной заготовкой. Однако частота этих смещений оказывается намного ниже частоты вынужденных ультразвуковых колебаний и находится на уровне собственных частот всей системы СПИД.

Следовательно, в этом случае за счет ультразвукового воздействия происходит кратное резонансное или около резонансное возбуждение стрелы, то есть когда частота ее собственных колебаний оказывается кратной частоте ультразвука. Учитывая, что частота возмущающих ультразвуковых колебаний на порядок и более пре-

вышает собственную частоту системы СПИД, в последней обязательно возникнут колебательные смещения ее подвижного звена - стрелы с алмазной заготовкой, обусловленные реализацией кратного резонансного режима.

Проведенные испытания такой конструкции распиловочной секции подтвердили правомерность выше отмеченных положений. Так при частоте ультразвуковых колебаний 43,6 кГц с амплитудой 8–10 мкм основная частота колебательных смещений алмазной заготовки находилась в диапазоне 185–235 Гц с амплитудой порядка 20–30 мкм. Однако, как было показано в разделе 2.1, такой уровень соотношения частоты и амплитуды колебаний является весьма низким как с точки зрения повышения производительности распиливания, так и качества обработанной поверхности. В первую очередь, это касается частоты колебательных смещений заготовки, значение которой оказалось на два порядка ниже частоты возмущающих ультразвуковых колебаний. Поэтому, даже несмотря на то, что амплитуда колебательных смещений заготовки в 2–3,5 раза превышает амплитуду ультразвуковых колебаний, значения факторов, определяющих повышение производительности распиливания (величина ударного импульса и частота их следования) и качества обработанной поверхности (амплитуда колебательной скорости) оказываются явно недостаточными, чтобы оказать ощутимое влияние на выходные показатели процесса.

Кроме того, в ходе испытаний была выявлена необходимость применения дополнительного стопорного винта на стреле, исключая перемещение опорного винта в пределах бокового зазора в резьбовом сопряжении со стрелой. В противном случае, из-за наличия этого зазора существенно снижается амплитуда колебательных смещений стрелы, а также происходит самоотвинчивание опорного винта в процессе обработки. В свою очередь, необходимость периодического стопорения опорного винта вносит в работу распиловщика хотя и не сложный, но дополнительный прием по управлению процессом обработки.

Обобщая все вышеизложенное, следует констатировать, что рассматриваемый вариант конструкции распиловочной секции нельзя признать удовлетворительным, так как в силу низкого диапазона частот и амплитуд колебательных смещений заготовки, он не может обеспечить ощутимого повышения производительности и качества

механического распиливания монокристаллов алмаза и других сверхтвердых материалов.

Как следует из работ [108], повысить частоту и амплитуду колебаний в акустических системах разомкнутого типа можно путем введения в их состав дополнительного подвижного промежуточного звена, например, шарика. В этом случае шарик устанавливается между выходным торцом ультразвукового преобразователя продольных колебаний и контактной поверхностью подвижного звена системы. За счет статического нагружения последнего обеспечивается силовое замыкание всех элементов акустической колебательной системы. При ее ультразвуковом возбуждении, когда амплитуда колебаний A_0 превышает удвоенную величину предварительного натяга $2x_{ст}$, т.е. когда выполняется неравенство (2.49), в системе устанавливается виброударный режим взаимодействия ее звеньев. Причем это взаимодействие представляет собой совокупность повторяющихся переходных процессов «затягивания» системы на виброударный режим и «срыва» с него. Реализация этого эффекта непосредственно связана с явлением динамического увода ее подвижного звена. В результате его периодических перемещений, обусловленных ударным воздействием шарика, величина зазора между торцом волновода и контактной поверхностью подвижного звена изменяется. По мере его увеличения происходит «затягивание» шарика на виброударный режим с возрастающей амплитудой колебаний. При достижении критической для данных условий ультразвукового возбуждения величины зазора наступает «срыв» виброударного режима, и подвижное звено системы под действием статической нагрузки перемещается в исходное положение до силового замыкания всех элементов системы. Затем вновь происходит ее «затягивание» на виброударный режим и т.д. В итоге подвижное звено системы совершает колебательные смещения, обусловленные его динамическим уводом, которые модулированы колебаниями более высокой частоты, возникающими в период «затягивания» системы на виброударный режим.

С учетом отмеченных положений был разработан и изготовлен вариант распиловочной секции, в котором для сообщения заготовке колебательных смещений была применена акустическая колебательная система разомкнутого типа с промежуточным подвижным элементом (шариком). В этом случае (рис. 2.43) на стреле 1 вместо

опорного винта устанавливался пьезокерамический ультразвуковой преобразователь продольных колебаний 2, имеющий двухступенчатый концентратор 3 волновой длины.

В узловом сечении на цилиндрической ступени концентратора посредством стопорных винтов преобразователь жестко связывался со стрелой. Под действием статической нагрузки, соответствующей усилию распиливания, выходной торец концентратора прижимался к шарiku 4 (промежуточному элементу системы) диаметром 3,2 мм и через него к регулируемой опоре 5, с помощью которой обеспечивалось необходимое перемещение стрелы в процессе распиливания.

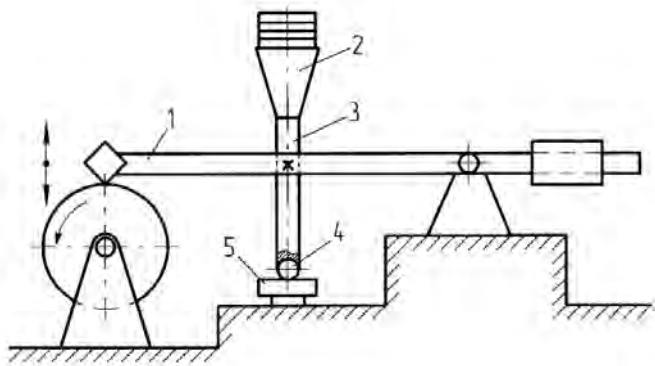


Рис. 2.43. Схема распиловочной секции с акустической колебательной системой с промежуточным элементом: 1 – стрела; 2 – преобразователь; 3 – концентратор; 4 – шарик; 5 – регулируемая опора

Для предотвращения выпадения шарика на торце концентратора была выполнена коническая зенковка. При возбуждении ультразвукового преобразователя на резонансной частоте 42,7 кГц с амплитудой колебаний выходного торца концентратора 8–10 мкм, в такой системе устанавливался виброударный режим взаимодействия ее звеньев с реализацией выше описанных эффектов.

В ходе испытаний данного варианта распиловочной секции были установлены ее основные эксплуатационные показатели. Как показали исследования, в отличие от предыдущего, в данном случае колебательные смещения стрелы с закрепленной на ней заготовкой происходят в более широком амплитудно-частотном диапазоне.

При этом можно выделить низкочастотную составляющую этих смещений порядка 187–220 Гц с амплитудой 0,03–0,05 мм и высокочастотную в диапазоне 0,9–1,2 кГц с амплитудой, не превышающей 0,006 мм. Возбуждение в системе низкочастотных колебательных смещений обусловлено явлением динамического увода стрелы, а высокочастотных – процессом «затягивания» шарика на виброударный режим.

Однако, несмотря на расширенный в данном случае амплитудно-частотный диапазон колебательных смещений заготовки, тем не менее его уровень остается недостаточным, чтобы обеспечить существенное повышение производительности и качества процесса распиливания хрупких материалов. Помимо этого, проведенные испытания, как в лабораторных, так и производственных условиях, выявили ряд недостатков эксплуатационного характера, присущих данному варианту распиловочной секции. В частности, было установлено, что для поддержания виброударного режима работы акустической колебательной системы с изменением в процессе распиливания статической нагрузки, необходимо постоянно регулировать (подстраивать) частоту возмущающих ультразвуковых колебаний, что усложняет выполнение операции. Самым существенным недостатком данного варианта, не позволяющим претендовать ему на практическое применение, является повышенный уровень шума, обусловленный именно виброударным режимом работы акустической колебательной системы.

В третьем варианте, схема которого приведена на рис. 2.44, ультразвуковые колебания возбуждались непосредственно в материале стрелы 1, изготовленной из сплава Д16Т.

Это достигалось за счет того, что пьезокерамический ультразвуковой преобразователь продольных колебаний 2 с помощью резьбовой шпильки 3 жестко закреплялся на верхней поверхности стрелы. На одном ее конце в подпружиненных державках устанавливались оправки с закрепленной заготовкой 4. За счет перемещения груза 5 на втором конце стрелы обеспечивалось создание требуемой статической нагрузки на заготовку, а с помощью опорного винта 6 регулировалась величина ее подачи в процессе распиливания.

В основу обоснования такого варианта введения ультразвуковых колебаний в зону распиливания было положено следующее положение теории распространения ультразвуковых волн.

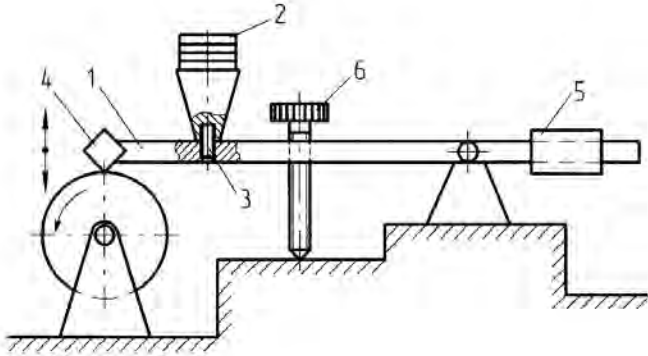


Рис. 2.44. Схема распиловочной секции при возбуждении ультразвуковых колебаний в материале стрелы: 1 – стрела; 2 – преобразователь; 3 – резьбовая шпилька; 4 – заготовка; 5 – груз; 6 – опорный винт

Так при сообщении пластине, в частном случае балке (аналог стрелы), продольных ультразвуковых колебаний в зависимости от ее формы и геометрических размеров, способа закрепления, а также места введения колебаний и их частоты, в ней можно возбудить ультразвуковые волны различных типов, то есть продольные, поперечные, изгибные и другие.

Очевидно, что для обеспечения заданного направления введения колебаний в зону обработки, то есть перпендикулярно торцевой поверхности распиловочного диска, наиболее рационально использовать изгибные колебания стрелы. Для этого необходимо при заданных ее размерах и способе закрепления, а также с учетом резонансной частоты ультразвукового преобразователя определить место введения продольных колебаний, чтобы возбудить в материале стрелы изгибную волну с требуемыми параметрами. Под ними понимается, во-первых, достаточная ее интенсивность, позволяющая сообщать колебания обрабатываемой заготовке с необходимой амплитудой, а, во-вторых, длина изгибной волны $\lambda_{из}$ должна быть такой, чтобы ее пучность совпадала с местом закрепления заготовки 1, а узловые сечения располагались в местах установки регулировочного винта 2 и опоры 3, как показано на рис. 2.45. При реализации этого условия потери акустической энергии будут минимальны.

С точки зрения возможности обеспечения этих требований следует подчеркнуть весьма полезное для данного случая свойство изгибной волны, заключающееся в дисперсии ее скорости в зависимости от геометрических размеров и способа закрепления твердого тела. Благодаря этому, изгибная волна как бы приспосабливается к параметрам тела, в котором она распространяется, чем достигается резонансный режим ее возбуждения. Так в рассматриваемом случае форма изгибной волны будет такой, что на свободных концах стрелы будут иметь место пучности колебаний, а между ними располагаться нечетное количество полуволен $\lambda_{из}/2$.

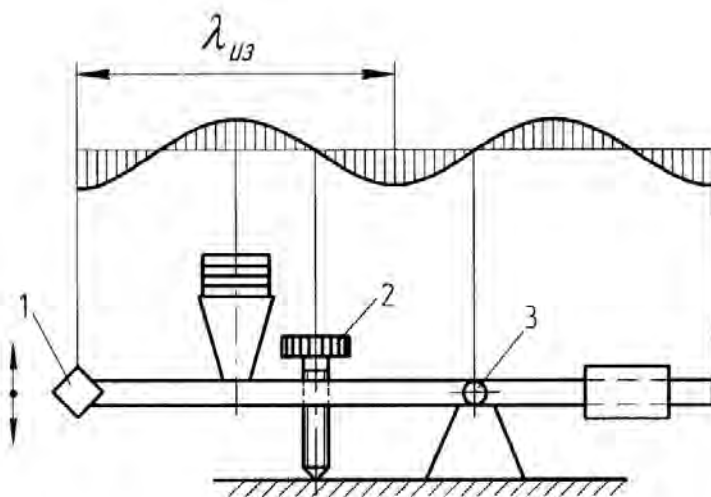


Рис. 2.45. Оптимальная форма изгибной волны, возбуждаемой в материале стрелы, обеспечивающая минимальные потери акустической энергии:
1 – заготовка; 2 – регулировочный винт; 3 – опора

Таким образом, требование, касающееся того чтобы пучность изгибной волны, то есть максимум колебательных смещений, располагался в месте закрепления обрабатываемой заготовки выполняется, при этом их направление поляризации полностью соответствует требуемому.

Последующий этап при разработке этого варианта технологического оборудования был связан с определением амплитудно-частотных параметров ультразвукового преобразователя продоль-

ных колебаний и места их введения в материал стрелы. При этом необходимо было учитывать следующие требования. Во-первых, габаритные размеры и масса преобразователя должны быть минимальны, но достаточны для создания возмущающего акустического поля необходимой интенсивности. Эти ограничения обусловлены необходимостью сохранить достаточно высокую чувствительность механизма нагружения стрелы и ее динамические характеристики. Во-вторых, место введения продольных ультразвуковых колебаний должно быть определено таким образом, чтобы узловые сечения возбуждаемой в стреле изгибной волны располагались в зонах установки на ней регулировочного винта и опоры.

В ходе решения этих задач, в первую очередь, необходимо было определить тип ультразвукового преобразователя, его рабочую частоту и конструктивное исполнение. В наибольшей степени указанным выше требованиям отвечают пьезоэлектрические преобразователи, которые имеют высокую удельную излучающую мощность, просты по конструкции, надежны в эксплуатации и не требуют принудительного охлаждения при длительной работе.

Исходя из этого, а также с учетом ограничений по массе рабочая частота преобразователя была принята равной $44 \pm 4,4$ кГц, что, в принципе, соответствует верхней границе частотного диапазона технологического применения ультразвука.

В качестве пьезоэлектрического материала была выбрана керамика группы цирконата титаната свинца ЦТС-23, выполненная в виде шайб с номинальной резонансной частотой 44 кГц. Эта керамика имеет высокую точку Кюри (300°C), а соответственно, ее рабочая температура превышает 200^0C , при этом интенсивность колебаний достигает 15 Вт/см^2 .

В настоящее время в ультразвуковых колебательных системах технологического назначения широко применяют пьезокерамические преобразователи типа «Сэндвич», предложенные Ланжевром. Возбуждение пьезопластин в них осуществляется таким образом, чтобы вся акустическая система работала как полуволновой излучатель. Металлические пластины в этом случае действуют как добавочные массы, снижая резонансную частоту преобразователя, благодаря чему устраняется необходимость применения толстых пьезоэлементов и улучшаются условия их охлаждения.

С учетом сказанного, а также на основе рекомендаций по расчету и проектированию таких излучателей, была разработана конструкция полуволнового пьезокерамического преобразователя продольных колебаний для возбуждения изгибной волны в материале стрелы. Он состоит (рис. 2.46) из двух пьезокерамических пластин 1, излучающей 2 и отражающей 3 накладок, контактных пластин 4 из мягкой фольги и стягивающего центрального болта 5.

Излучающая накладка представляет собой конический концентратор, изготовленный из сплава Д16Т, то есть того же, что и стрела.

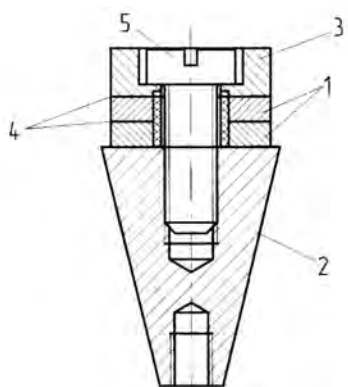


Рис. 2.46. Конструктивное исполнение полуволнового пьезокерамического преобразователя продольных колебаний: 1 – пьезокерамические пластины; 2 – излучающая накладка; 3 – отражающая накладка; 4 – контактная пластина; 5 – стягивающий центральный болт

Благодаря этому потери акустической энергии в месте их соединения будут минимальны, так как акустические сопротивления сред на границе раздела оказываются одинаковыми. На выходном торце концентратора выполнено резьбовое отверстие, в которое заворачивается шпилька для закрепления преобразователя на стреле. На входном (широком) торце концентратора имеется резьбовое отверстие для центрального стягивающего болта. Отражающая накладка изготавливалась из стали 45 и в ней предусмотрено отверстие для стягивающего болта с зенковкой под его головку. Для изоляции пьезопластин от корпуса преобразователя на стягивающем болте устанавливалась втулка 6, изготовленная из капрлона. В процессе

сборки преобразователя с целью обеспечения надежного акустического контакта все сопрягаемые поверхности предварительно тщательно притирались и на них наносился тонкий слой вазелинового масла.

Резонансная частота собранного преобразователя составляла 43,8 кГц, максимальная амплитуда колебаний выходного торца концентратора достигала 8 мкм при расчетной выходной мощности 15 Вт, его масса была равна 0,18 кг.

Для решения очередной задачи, связанной с определением места введения продольных ультразвуковых колебаний в материал стрелы, то есть места ее соединения с преобразователем, были проведены специальные экспериментальные исследования. Предварительно на основании расчетов была определена длина изгибной волны для стержня, имеющего те же геометрические размеры, что и стрела. Ее величина при частоте возбуждения 43,8 кГц составила 118 мм. Исходя из этого, и с учетом расположения пучности колебаний изгибной волны на конце стрелы, где закрепляется заготовка, было расчетным путем определено место введения продольных колебаний. Оно должно находиться на расстоянии равном половине длины изгибной волны от свободного конца стрелы, т.е. $\lambda_{из}/2 = 59$ мм.

Однако, принимая во внимание, что конструктивное исполнение стрелы отличается от принятого в расчетах стержня постоянного сечения, необходимо было уточнить место введения продольных ультразвуковых колебаний в материал стрелы путем проведения соответствующих экспериментальных исследований. Их цель заключалась в том, чтобы, изменяя положение места введения колебаний в окрестности расчетной точки, определить фактическую форму изгибной волны в стреле и добиться такого положения, при котором она соответствовала бы выше указанным требованиям. То есть пучности колебаний должны располагаться на свободных концах стрелы, а узловые сечения изгибной волны должны находиться в окрестностях расположения регулировочного винта и опоры.

Для проведения этих экспериментальных исследований предварительно на стреле в окрестности расчетного места введения продольных колебаний, то есть места соединения преобразователя, был профрезерован сквозной узкий паз. Благодаря этому, с помощью зажимного болта стало возможным изменять место присоединения преобразователя относительно свободного конца стрелы.

С целью фиксации места расположения узловых сечений изгибной волны по длине стрелы использовался метод получения на ее поверхности фигур Хладни. Его суть заключается в том, что, если на колеблющуюся поверхность тела насыпать мелкодисперсный порошок, то его частицы будут располагаться (скапливаться) в местах, соответствующих узловым сечениям ультразвуковой волны. Визуализируя, таким образом, распределение узловых сечений, можно определить форму и параметры ультразвуковой волны, распространяющейся в данном теле.

Методика проведения этих экспериментальных исследований включала в себя последовательное выполнение следующих действий, которые проводились непосредственно на промышленной распиловочной секции станка ШП–2. В начале на стреле закреплялся преобразователь продольных ультразвуковых колебаний по середине профрезерованного паза, то есть в расчетном месте введения колебаний. Затем путем перемещения противовеса на противоположном конце стрелы добивались ее уравнивания в горизонтальном положении относительно опоры. После этого регулировочный винт доводился до контакта его опорной поверхности с основанием секции, и за счет фиксированного перемещения противовеса в сторону уменьшения уравнивающего момента создавалось его статическое нагружение. По завершению этих подготовительных действий, от ультразвукового генератора включалось питание преобразователя и на его резонансной частоте происходило возбуждение изгибной волны в материале стрелы. В этом состоянии на ее верхнюю плоскую поверхность с высоты 100–150 мм посыпался мелкодисперсный абразивный порошок (карбид кремния). Скапливаясь в узловых сечениях изгибной волны, он создавал на поверхности стрелы фигуры Хладни, в частности, чередующиеся поперечные полосы. Измерив расстояние между ними, которое равно $\lambda_{из}/2$, определяли длину изгибной волны, а также находили координаты расположения пучностей колебаний, которым соответствуют значения $\lambda_{из}/4$. При этом фиксировалась форма изгибной волны в окрестностях установки регулировочного винта и опоры.

После завершения этой серии экспериментов, питание преобразователя отключалось; абразивный порошок удалялся с поверхности стрелы и проводилась подготовка распиловочной секции к следующей серии экспериментов. Для этого, с учетом результатов

предшествующих опытов, осуществлялось изменение положения места соединения преобразователя со стрелой, путем его перемещения в ту или иную сторону вдоль паза и закреплении в этом положении. Далее путем выполнения всех выше описанных процедур определялись параметры изгибной волны, соответствующие новому месту введения продольных ультразвуковых колебаний. Конечной целью этих экспериментальных исследований явилось определение места соединения преобразователя со стрелой, при котором в ее материале возбуждается изгибная волна, имеющая пучности колебаний на свободных концах стрелы, а расположение узловых сечений совпадает с окрестностями установки на ней регулировочного винта и опоры. Эта цель была достигнута и для принятых условий. Координата введения продольных ультразвуковых колебаний составила 26 мм от свободного конца стрелы, где закрепляется заготовка.

На основании полученных данных был изготовлен опытный образец стрелы с ультразвуковым преобразователем, который был установлен на распиловочную секцию станка ШП-2 и проведены предварительные испытания по оценке работоспособности созданного оборудования. В ходе их выполнения было установлено, что примененная акустическая система позволяет сообщать обрабатываемой заготовке ультразвуковые колебания в направлении перпендикулярном торцевой поверхности распиловочного диска с максимальной амплитудой 4–6 мкм, что, как показали исследования, является достаточным для реализации эффектов от ультразвукового воздействия.

Следует подчеркнуть, что созданная конструкция распиловочного оборудования полностью соответствует выше сформулированным требованиям. В частности, она обеспечивает введение ультразвуковых колебаний в зону обработки в требуемом направлении путем сообщения их распиливаемой заготовке. Здесь важно отметить, что достигнуто это без значительных изменений существующей конструкции станочного оборудования, благодаря чему последовательность и содержание приемов, выполняемых рабочим-распиловщиком, остаются практически такими же, как и при обработке в обычных условиях с добавлением только элементарных приемов по включению и выключению ультразвукового преобразователя. Кроме того, не изменяются и затраты вспомогательного времени T_v , входящие в состав нормы штучно - калькуляционного

времени $T_{ш.к.}$. Поэтому эффективность применения разработанного станочного оборудования для распиливания монокристаллов алмаза и других драгоценных камней будет определяться только степенью воздействия ультразвука на повышение интенсивности распиливания, то есть на сокращение основного времени T_0 выполнения операции.

Принимая во внимание, что созданное станочное оборудование практически не изменяет последовательности и содержания, выполняемых при распиливании приемов, в данном случае речь идет о корректировке существующей технологии механического распиливания указанных материалов, то есть дополнением ее действиями, связанными с применением ультразвука.

Вместе с тем, применение ультразвуковых преобразователей для сообщения колебаний обрабатываемой заготовке требует оснащения каждой распиловочной секции отдельным ультразвуковым генератором и системой автоматического поддержания резонансного режима работы акустической колебательной системы, что в производственных условиях становится экономически нецелесообразным из-за значительной стоимости этого оборудования. Поэтому с точки зрения перспективности промышленной реализации способа распиливания с сообщением заготовке колебаний следует использовать более простые и дешевые источники возбуждения колебаний, к которым относятся низкочастотные.

3. ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОЦЕССЕ РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Обоснование выбора рационального типа вибратора для распиливания сверхтвердых кристаллов

Как показывает практика, успешное внедрение в производство новых или усовершенствованных технологических процессов, в первую очередь, определяется показателями разработанного для их реализации оборудования, его сложностью, и, соответственно, стоимостью, надежностью и удобством в эксплуатации, отсутствием вредного воздействия на обслуживающий персонал и т. д. С этих

позиций, в рамках решаемых в данной работе задач, первостепенное значение имеет выбор рационального типа вибратора для сообщения вынужденных колебаний обрабатываемой заготовке.

В основу подхода, при таком выборе, следует положить следующие принципиально важные обстоятельства. На сегодняшний день на предприятиях, связанных с алмазобработкой, операция распиливания выполняется на станках мод. ШП–2 с гравитационной подачей заготовки, парк которых насчитывает сотни штук. Поэтому применяемый вибратор не должен вносить существенных изменений в их конструкцию. В оптимальном варианте он должен просто встраиваться в распиловочную секцию без каких-либо ее дополнительных доработок. Кроме того, примененный вибратор не должен усложнять проведение самой операции, т. е. количество и сложность приемов, выполняемых рабочим-распиловщиком должны оставаться такими же, как при обработке в обычных условиях. И, наконец, вибратор должен иметь простую систему управления, высокую надежность при длительном режиме работы и не оказывать вредного воздействия на рабочего-распиловщика.

Для решения поставленной задачи был проведен комплекс экспериментальных исследований с использованием наиболее распространенных типов вибраторов, которыми оснащалась распиловочная секция станка мод. ШП–2. В ходе их проведения оценивалась степень соответствия каждого из них выше перечисленным требованиям, что позволило таким образом определить оптимальный, применительно к распиливанию, тип вибратора. Ниже приведены результаты этих исследований, которые включают описание конструкции и принципа действия каждого из примененных вибраторов, оценку уровня возбуждаемых ими колебаний заготовки, а также отмечаются их достоинства и недостатки.

3.1.1. Вибратор с возбуждением колебаний при помощи электромагнитной диафрагмы

Одним из типов вибраторов, широко используемых в промышленности, являются резонансные низкочастотные вибрационные машины общего назначения с электромагнитным возбудителем колебаний. Согласно [109], такие генераторы механических колебаний развивают толкающие усилия от 10 Н до нескольких меганью-

тонов, в частотном диапазоне 5–5000 Гц (стационарные) и 5–15 000 Гц (переносные). При этом развиваются амплитуды перемещения подвижной части до нескольких десятков миллиметров. Кроме того, среди достоинств вибраторов данного типа можно отметить малые нелинейные искажения, однонаправленность колебаний, широкий частотный диапазон, временную стабильность работы.

Наибольшее распространение в прецизионной вибротехнике получили электродинамические генераторы механических колебаний, где в воздушном кольцевом зазоре магнитопровода 4 (рис. 3.1), охватывающего круглый керн 3, перемещается катушка переменного тока 1.

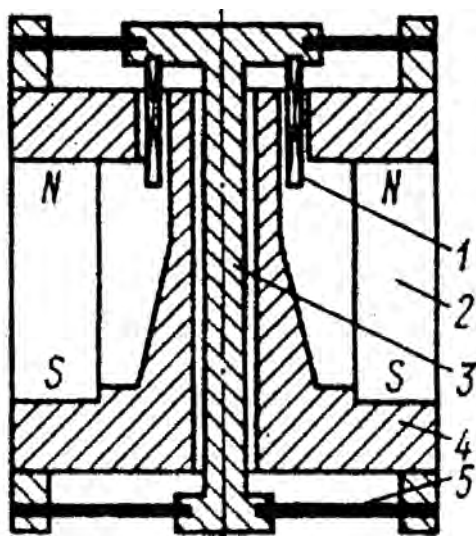


Рис. 3.1. Принципиальная конструктивная схема электромагнитного вибропривода:
1 – катушка; 2 – магниты; 3 – керн; 4 – магнитопровода; 5 – упругий элемент

Возбуждение системы осуществляется от источника постоянного тока (для стационарных устройств) или от постоянных магнитов 2. Подвижная катушка 1 жестко соединяется с рабочим столом и при помощи упругих элементов 5 перемещается лишь в осевом направлении. Отметим, что использование для питания подвижной катуш-

ки переменного тока ограничивает получаемую при помощи вибратора частоту колебаний, которая, в большинстве случаев, равняется 50 или 100 Гц. Поэтому применение таких схем в конструкции распиловочной стрелы нежелательно. Для получения большего диапазона частот вынужденных колебаний распиловочной стрелы использовался способ питания катушки намагничивания с помощью постоянного тока с применением концевых прерывателей.

Учитывая необходимость получения значительной по площади опорной колеблющейся поверхности для размещения на ней упругой прокладки распиловочной стрелы, в качестве привода для сообщения вынужденных колебаний была использована электромагнитная диафрагма, конструкция которой показана на рис. 3.2. Вибрационная электромагнитная диафрагма смонтирована в корпусе 1, который закрыт кольцевой крышкой 2. Между крышкой и корпусом установлена стальная круглая звуковая мембрана 3. Мембрана со стальным резонаторным диском 4 присоединена гайкой 5 к якорю 6. К корпусу приварен сердечник 7 электромагнита и ярмо 8. Катушка 9 электромагнита имеет 175 витков провода диаметром 0,51 мм, сопротивление обмотки 1,02 Ом. Она изолирована от «массы» пробковыми прокладками и нейлоновой втулкой. В корпусе установлен мостик 10, на котором смонтирован прерыватель 11. Он состоит из изолированных от «массы» (текстолитовыми или гетинаксовыми прокладками) верхнего держателя 12 с подвижным вольфрамовым контактом и нижней упругой (пружиной) пластины 13 с подвижным вольфрамовым контактом прерывателя. По всей поверхности пластины 13 установлена изоляционная пластмассовая пластина 14. Постоянный электрический ток подводится к держателю 12, через штекер 15, по проводу 16, далее через контакты прерывателя 11 на упругую пластину 13 и по проводу 17 в катушку электромагнита и из нее через штекер 18 к выключателю звуковой электромагнитной диафрагмы. После намагничивания сердечник 7 электромагнита притянет якорь 6, который буртом нажмет на край упругой пластины 13 и разомкнет контакты прерывателя. При размыкании электрической цепи катушки она размагничивается и под действием сил упругости мембраны 3 и пластины 13 якорь 6 возвратится в исходное положение. Ход якоря определяется зазором между внутренними торцами сердечника 7 и якоря 6 в пределах $0,4 \pm 0,05$ мм. Он регулируется толщиной прокладок 19. Период замкнутого состояния

контактов, а, следовательно, сила потребляемого тока, частота и амплитуда колебаний, создаваемые при работе электромагнитной диафрагмы, регулируются винтом 20, который перемещает подвижный конец мостика 10.

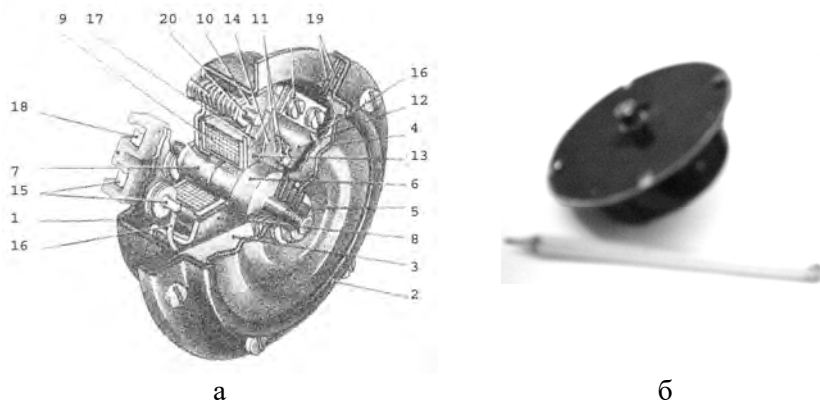
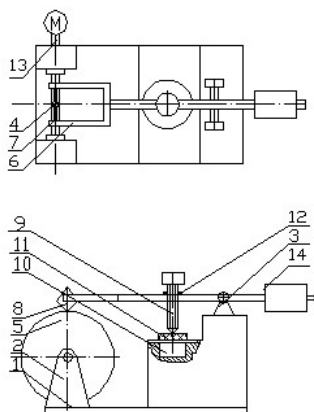


Рис. 3.2. Вибрационная электромагнитная диафрагма:

- а – конструкция; б – общий вид; 1 – корпус; 2 – кольцевая крышка; 3 – звуковая мембрана; 4 – резонаторный диск; 5 – гайка; 6 – якорь; 7 – сердечник электромагнита; 8 – ярмо электромагнита; 9 – катушка; 10 – мостик; 11 – прерыватель; 12 – держатель; 13 – упругая пластина; 14 – изоляционная пластина; 15 – штекер; 16 – провод; 17 – провод; 18 – штекер; 19 – прокладки; 20 – винт

Для передачи вибрационных колебаний на распиловочную стрелу использовалась установка, общий вид и схема которой показаны на рис. 3.3. Из особенностей конструкции отметим, что на опорной площадке станины 1 находится вибрационная электромагнитная диафрагма 10, а регулировочный винт 9 опирается на упругую подушку 11, которая предназначена для плавной подачи кристалла 8 на режущий инструмент 5. Для того чтобы во время распиливания заготовки 8 стрела 6 не перемещалась самопроизвольно под воздействием вибрационных колебаний, установлен механизм 12, противодействующий самоотвинчиванию. Для возбуждения и передачи вибрационных колебаний на опорный винт, а вместе с ним и на распиловочную стрелу служит источник питания постоянного тока (на чертеже не указан).



а



б

Рис. 3.3. Установка для распиливания сверхтвердых кристаллов с реализацией виброударного режима работы при помощи электромагнитной диафрагмы: а – схема; б – общий вид; 1 – станина; 2 – передняя пара стоек; 3 – задняя пара стоек; 4 – шпиндель; 5 – распиловочный диск; 6 – стрела; 7 – оправки; 8 – распиливаемый образец; 9 – регулировочный винт; 10 – электромагнитная диафрагма; 11 – упругая подушка; 12 – механизм, противодействующий самоотвинчиванию; 13 – электродвигатель привода распиловочного диска; 14 – регулируемый противовес

Установка работает следующим образом. Для реализации низкочастотных колебаний на рабочую обмотку вибрационной электро-

магнитной диафрагмы 10 от источника питания постоянного тока подается напряжение равное 12 В. Через упругую подушку 11 эти колебания передаются опирающемуся на нее регулировочному винту 9. При помощи последнего стрела 6 с закрепленным кристаллом 8 опускается на режущий инструмент 5.

В качестве несомненных достоинств данной схемы отметим возможность более точной настройки для создания требуемой амплитуды и частоты, по сравнению с использованием в качестве источника вибрации ультразвуковых преобразователей.

Амплитуду можно регулировать несколькими способами:

- изменением напряжения и силы тока, подаваемых на рабочую обмотку вибрационной электромагнитной диафрагмы;
- регулированием с помощью прокладок зазора между внутренними торцами сердечника и якоря диафрагмы;
- перемещением подвижного конца мостика с помощью регулировочного винта диафрагмы (при повороте винта по часовой стрелке амплитуда колебаний увеличивается, при повороте против часовой стрелки – уменьшается);
- использованием опорной мембраны различной толщины.

К преимуществам описанной выше схемы также можно отнести получение стабильных колебаний, по сравнению с получаемыми с помощью ультразвуковых преобразователей.

К недостаткам описанной выше схемы относится отсутствие возможности получения широкого спектра колебаний. Необходимо также отметить значительное увеличение уровня шума, создаваемого при работе вибрационной электромагнитной диафрагмы, вследствие значительной площади колеблющейся поверхности диафрагмы.

Как недостаток, присущий всем электромагнитным вибраторам, следует отметить значительные потоки рассеяния и потребление большого количества энергии. Это вызывает увеличение рабочих токов питания диафрагмы до 6–10 А, что при длительной работе описанной выше экспериментальной установки приводит к значительному нагреву рабочих обмоток электромагнитной диафрагмы.

В результате проведенных испытаний разработанной конструкции было установлено, что секция, оснащенная электромагнитным вибратором, обеспечивает стабильную амплитуду колебаний. Однако происходит некоторое демпфирование колебаний вследствие их

подачи снизу упругой подушки на распиловочный винт. Кроме того, в данной схеме возбуждения колебаний работа электромагнитного вибратора вызывала отрыв заготовки от распиловочного диска в процессе обработки, что уменьшало время активной фазы взаимодействия режущего инструмента с образцом, вызывая снижение производительности распиливания.

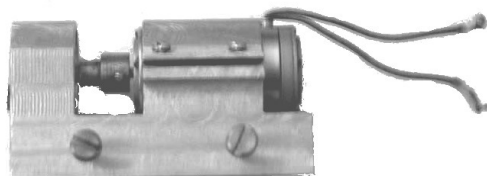
3.1.2. Вибратор с возбуждением колебаний при помощи центробежного вибратора

Наибольшее распространение для погрузки, разгрузки и транспортирования сыпучих материалов, для уплотнения бетона и грунтов [110] получили вибраторы центробежного типа. Это связано с их компактностью, по сравнению с электромагнитными вибраторами, а также простотой в обслуживании и надежностью в работе.

По характеру возбуждаемых колебаний вибраторы делятся на типы:

- 1) с круговыми колебаниями при параллельном движении оси вибратора;
- 2) с круговыми колебаниями при конусообразном движении оси вибратора;
- 3) с направленными (возвратно-поступательными) колебаниями.

В качестве вибратора для сообщения распиловочной стреле возбужденных колебаний было предложено использовать первый тип центробежных вибраторов, как наиболее простой и надежный по конструкции. Он приводился в движение микроэлектродвигателем постоянного тока мод. ДПМ-25-Н1-03 (рис. 3.4).



а



б

Рис. 3.4. Центробежный вибратор: а – общий вид; б – использованный электродвигатель с механизмом возбуждения вибрации

Данная модель электродвигателя отличается малыми габаритными размерами, что позволяет относительно легко встроить его в конструкцию распиловочной секции при значительной частоте вращения выходного вала. Основные характеристики использованного электродвигателя приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные характеристики двигателя центробежного вибратора

Напряжение питания, В	Номинальная мощность, Вт	Максимальная частота вращения выходного вала, мин ⁻¹	Номинальный момент на валу, мН·м	КПД, %	Диаметр двигателя, мм	Масса двигателя, кг
12	2,77	6000	4,41	27	25	0,12

Схема и общий вид экспериментальной установки представлены на рис. 3.5. Отметим, что в конструкцию установки дополнительно был введен вибратор с микроэлектродвигателем, который закреплялся на верхней плоскости стрелы между регулировочным винтом и осью поворота распиловочной стрелы. Для возбуждения колебаний на выходном валу электродвигателя закреплялся уголок с неуравновешенной массой. С целью регулирования амплитуды колебаний в уголке было выполнено отверстие для дополнительных грузов, представляющих собой набор свинцовых пластинок.

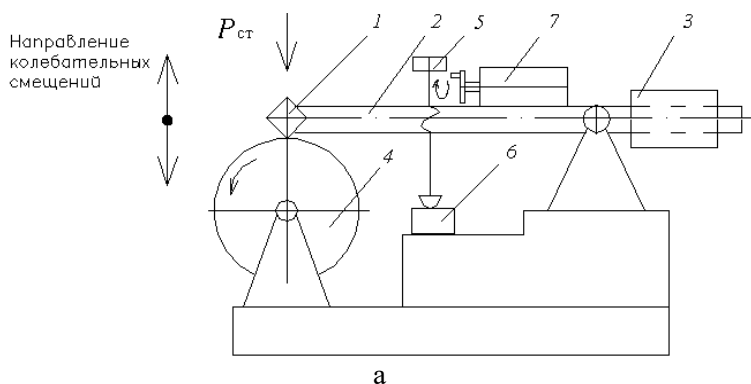
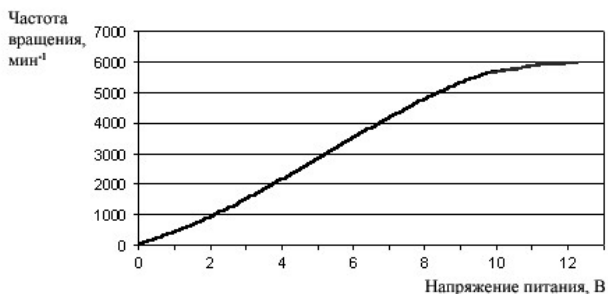


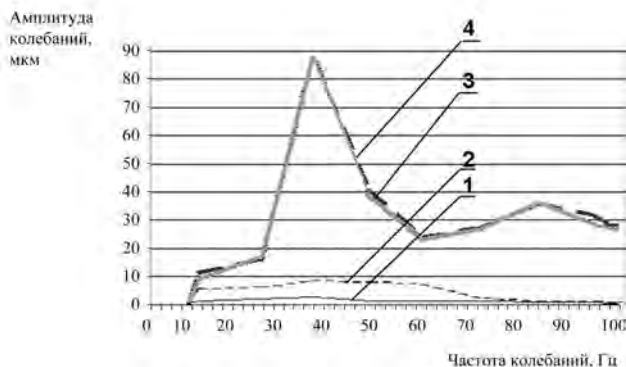
Рис. 3.5. Экспериментальная установка с центробежным вибратором:
 а – схема; б - фотография общего вида; 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – стрела;
 3 – противовес; 4 – распиловочный диск; 5 – регулировочный винт; 6 – упругая прокладка; 7 – вибратор

Так как в процессе распиливания стрела, посредством регулировочного винта, опирается на упругую прокладку, то при вращении неуравновешенной массы стрела вместе с заготовкой совершают колебательные смещения в направлении перпендикулярном торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска. Амплитуда и частота этих смещений регулировалась за счет изменения величины и положения неуравновешенной массы относительно оси вала, а также частоты его вращения. Учитывая применение центробежного

вибратора, следует отметить, что получаемая амплитуда колебаний распиловочной стрелы зависит от частоты вращения вала двигателя. Поэтому необходимо было определить зависимости параметров колебаний от скорости его вращения и степени неуравновешенности уголка, которая регулировалась количеством дополнительных свинцовых прокладок. Полученные зависимости представлены на рис. 3.6.



а



б

Рис. 3.6. Характеристики распиловочной стрелы с центробежным вибратором: а – зависимость частоты вращения электродвигателя от подаваемого напряжения питания; б – амплитудно-частотная характеристика разработанной установки; 1 – масса неуравновешенных грузов уголка 3,43 г; 2 – масса неуравновешенных грузов уголка 5,28 г; 3 – масса неуравновешенных грузов уголка 6,28 г (правая часть шарнирного устройства стрелы); 4 – масса неуравновешенных грузов уголка 6,28 г (левая часть шарнирного устройства стрелы)

Необходимо отметить, что разработанная конструкция отличается простотой и самое важное, не требует изменений в конструкции серийной распиловочной стрелы. В качестве несомненного достоинства данной схемы является возможность получения резонансного режима работы стрелы. Это позволяет использовать доступные электродвигатели малой мощности, что приводит к уменьшению габаритных размеров вибратора и использованию меньшей массы неуравновешенных грузов, а это увеличивает срок службы подшипникового узла микродвигателя. Вибрационные параметры колебаний имеют стабильное значение на всем протяжении работы установки. Следует отметить также, что активная фаза виброударного режима распиливания, т. е. взаимодействие торца распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой происходит в промежутке, когда дисбаланс находится в нижней части своей траектории вращения и прижимает заготовку к распиловочному диску. Это выгодно отличает данную схему возбуждения колебаний от рассмотренных ранее, в которых, в результате воздействия вибратора, происходит отрыв обрабатываемого кристалла от режущего инструмента, а активное их взаимодействие происходит только после возвращения распиловочной стрелы в первоначальное положение под собственной массой. Кроме того, к преимуществу данной схемы можно отнести точную настройку для создания требуемой амплитуды и частоты вибрационных колебаний.

Амплитуду можно регулировать несколькими способами:

1. изменением массы дополнительного груза на шайбе. При увеличении массы пропорционально увеличивается и центробежная сила, передаваемая вращающимся электродвигателем на распиловочную стрелу;
2. изменением частоты вращения вала электродвигателя. Амплитуда вибрационных колебаний будет пропорционально возрастать с увеличением квадрата частоты вращения вала;
3. изменением положения электродвигателя вдоль распиловочной стрелы относительно задней пары стоек станины экспериментальной установки.

При перемещении электродвигателя в сторону задних стоек амплитуда вибрационных колебаний будет возрастать, так как увеличивается отношение расстояний L_2/L_1 . Учитывая, что распиловочная стрела представляет собой рычаг второго рода (рис. 3.7), пропорци-

анально этому соотношению увеличивается и амплитуда вибрационных колебаний в точке Б.

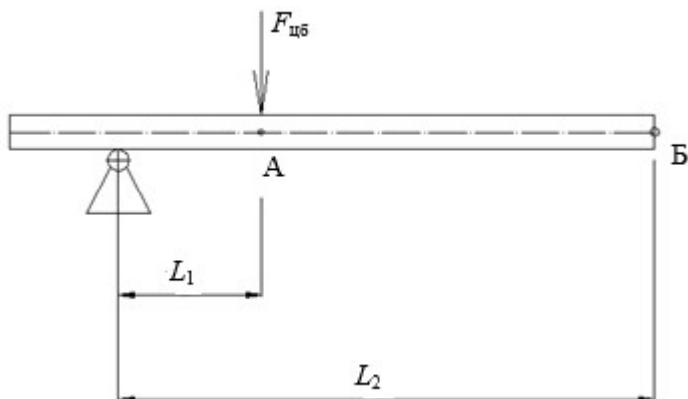


Рис. 3.7. Схема, поясняющая изменение амплитуды вибрационных колебаний при изменении положения электродвигателя постоянного тока относительно распиловочной стрелы: $F_{цб}$ – центробежная сила, действующая со стороны неуравновешенного вращающегося электродвигателя постоянного тока; А, Б – точки приложения центробежной силы $F_{цб}$ и крепления обрабатываемой заготовки к распиловочной стреле, соответственно; L_1, L_2 – соответственно, расстояния от оси вращения стрелы до точек А и Б

При использовании данного вибратора частота вынужденных колебаний равна частоте вращения электродвигателя вибратора, что позволяет плавно регулировать частоту передаваемых на распиловочную стрелу колебаний, изменяя напряжение питания электродвигателя. Необходимо отметить значительное снижение уровня шума, создаваемого при работе рассмотренной выше экспериментальной установки, особенно по сравнению со схемой возбуждения вибрационных колебаний, описанной в первом разделе данной главы.

Однако получение частот колебаний выше 150 Гц является затруднительным из-за ограничения максимальной скорости вращения выходного вала электродвигателя вибратора. Кроме того, невозможным представляется получение широкого спектра колебаний.

Вместе с тем, из рассмотренных вариантов устройство данного вибратора является наиболее простым и надежным, что позволяет вести продолжительное распиливание с реализацией виброударного режима при стабильных по амплитуде колебаниях. Это является крайне важным, учитывая, что время выполнения операции распиливания монокристаллов алмаза, в зависимости от его размеров и качества, составляет не менее 30 мин. Кроме того, использование микроэлектродвигателя для вращения дисбаланса позволило снизить его габаритные размеры, что дало возможность встроить вибратор в распиловочную секцию станка мод. ШП-2 без каких-либо изменений в его конструкции. Это приводит к тому, что работа распиловщиков, за исключением приведения вибратора во вращение, не изменится. Необходимо отметить также простую систему регулирования частоты вынужденных колебаний с помощью источника питания постоянного тока, гибкую систему регулирования амплитуды возникающих колебаний и пониженный уровень шума при работе центробежного вибратора.

3.2. Экспериментальные исследования процесса распиливания хрупких неметаллических материалов с использованием центробежного вибратора

В результате анализа из всех описанных выше типов вибраторов был выбран центробежный тип вибратора и на его основе создана конструкция распиловочной секции с центробежным вибратором (рис. 3.5), позволяющей осуществлять распиливание заготовки, как в обычных условиях, так и при виброударном режиме.

3.2.1. Инструмент, материалы и образцы, примененные в исследованиях

Режущим инструментом при распиливании служили бронзовые распиловочные диски (БрОФ 6,5–0,15) диаметром 76 мм и толщиной 0,05 мм со следующими исходными параметрами: среднее арифметическое отклонение профиля 0,3–0,63 мкм, разнотолщинность до 2,5 мкм и микротвердость 2100–2400 МПа.

Для распиливания использовалась одна партия серийных распиловочных дисков РАУП ГПО «Кристалл». Боковые поверхности

данных инструментов были шаржированы порошком АСН 20/14. Основные размеры распиловочного диска приведены на рис. 3.8.

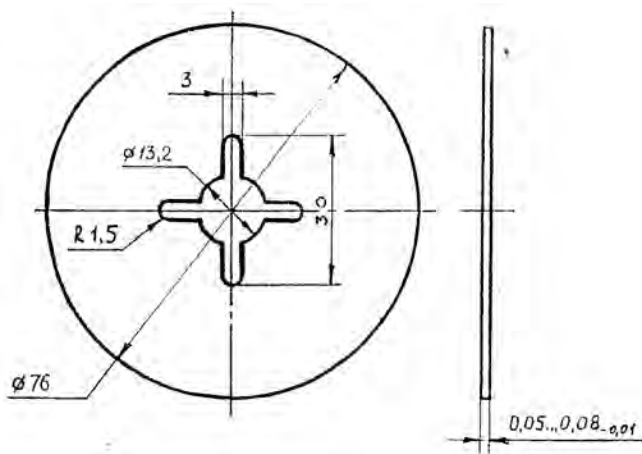


Рис. 3.8. Конструкция распиловочного диска

Очевидно, что проведение полномасштабных исследований по виброударному распиливанию монокристаллов алмаза не представляется возможным, вследствие их значительной стоимости и особого режима работы с ними. Поэтому при проведении экспериментов для обработки использовались образцы из синтетического корунда (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Общий вид образцов из синтетического корунда

Для заготовок была выбрана форма кубиков с размером ребра, равным $5 \pm 0,2$ мм. Контроль размеров сторон заготовок выполнялся с помощью штангенциркуля типа ШЦ-1 с величиной отсчета по нониусу равной 0,05 мм.

Выбор данных материалов обусловлен следующим. Синтетический корунд характеризуется высокой твердостью (9 по относительной шкале Мооса) [111]. Для его распиливания необходимо применение методики и оборудования, используемых для обработки натуральных и синтетических монокристаллов алмаза. Это позволит более точно провести моделирование процессов обработки монокристаллов алмаза и использовать полученные результаты в реальных производственных условиях.

3.3. Методы и средства измерения основных параметров процесса распиливания

Интенсивность распиливания, характеризующая производительность процесса, оценивается отношением площади распиленной заготовки ко времени обработки ($\text{мм}^2/\text{мин}$). В ходе каждого опыта определялось время распиливания с помощью электронного секундомера. Для определения площади распиленной поверхности использовался оптический визирный метод определения длины сторон полученного в сечении параллелограмма с помощью микроскопа БМИ ГОСТ 8074-82.

После нахождения площади распиленной поверхности полученное значение делилось на время выполнения опыта, что давало возможность оценить интенсивность распиливания.

Наряду с высокой производительностью операция распиливания монокристаллов алмаза обязательно должна обеспечивать высокое качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, что продиктовано требованием минимизации потерь обрабатываемого сырья на последующей операции их подшлифовки. Поэтому крайне важным представляется оценка шероховатости распиленной поверхности, как одного из параметров характеризующих качество обработанных заготовок. Для определения числовых значений шероховатости поверхности использовались параметры: высота неровностей профиля по 10 точкам Rz и среднее арифметическое отклонение профиля Ra.

После распиливания на требуемых режимах образец снимался с оправки, тщательно промывался и обезжиривался ацетоном. Затем с помощью профилографа-профилометра модели 252 измерялась шероховатость поверхности площадок распиленного образца. При этом измерения проводились в направлении перпендикулярном следам обработки.

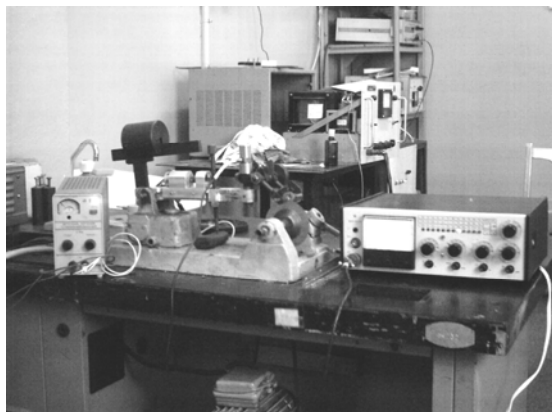
Кроме того, для оценки качества поверхности по глубине пропила, а также изучения топографии обработанной поверхности были сделаны фотографии распила. Для этого был использован сканирующий электронный микроскоп модели «Cam Scan» фирмы «Кембридж-инструмент» (Англия).

Для определения амплитуды вибрации, создаваемой на распиловочной стреле, был использован виброметр типа 2П1 фирмы «Брюль и Кьер» с вибропреобразователем типа 4370 этой же фирмы (рис. 3.10).

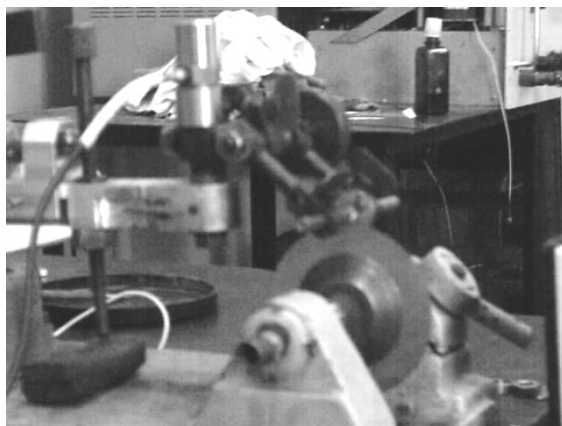
Учитывая, что вибрационные измерения могут быть достоверными только при наличии хорошего и надежного контакта виброприемника с колеблющейся поверхностью, то вибропреобразователь устанавливался при помощи специального приспособления с постоянным магнитом на плоской поверхности шарнирного устройства распиловочной стрелы, выполненного из ферромагнитного материала (сталь Ст3 ГОСТ 380-2005). Измерения проводились на правой и левой консолях для закрепления оправок. Это делалось с целью определения демпфирующего влияния поворотной ручки шарнирного устройства на амплитуду вынужденных колебаний распиловочной стрелы. Измерение частоты вращения электродвигателя осуществлялось строботаксометром модели 2008 с диапазоном контролируемого параметра в пределах 120–25000 мин⁻¹. Полученное значение частоты вращения равнялось частоте колебаний, создаваемых вибратором.

Так как распиловочная стрела представляет собой рычаг, то для определения значения статической нагрузки на обрабатываемую заготовку осуществлялось ее уравнивание. Для этого была добавлена трособлочная система, один конец которой закреплялся на оправке шарнирного устройства стрелы. На втором конце системы находилась чаша, которую можно нагружать с помощью набора разновесов (рис. 3.11). Чаша трособлочной системы последовательно нагружалась набором гирь с разницей между значениями про-

межуточных масс равной одному грамму. После того, как происходило изменение положения распиловочной стрелы под действием грузов, измерения прекращались и фиксировалась суммарная масса гирь на чаше трособлочной системы.



а



б

Рис. 3.10. Определение вибрационных характеристик распиловочной секции:
а – общий вид виброметра типа 2П1 фирмы «Брюль и Кьер»
с вибропреобразователем типа 4370 для определения амплитуды колебаний;
б – схема монтирования вибропреобразователя на шарнирном устройстве
распиловочной стрелы

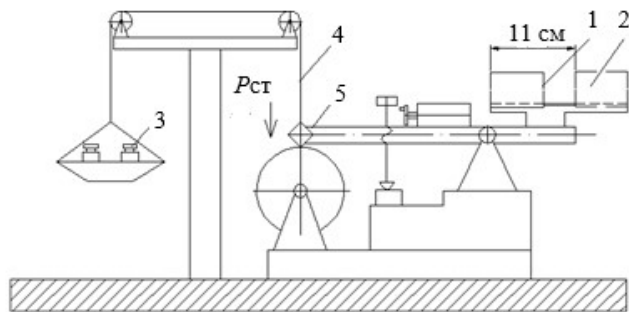


Рис. 3.11. Схема измерения статической нагрузки: 1 – начальное значение противовеса; 2 – конечное значение противовеса; 3 – набор разновесов; 4 – трособлочная система; 5 – распиловочная стрела

Измерения проводились через каждый сантиметр для различных значений смещения противовеса стрелы от его начального положения. За начальное принималось положение противовеса, при котором обеспечивалась максимальная статическая нагрузка на заготовку.

График зависимости статической нагрузки на обрабатываемую заготовку от положения регулируемого противовеса для двух типов установок представлен на рис. 3.12.

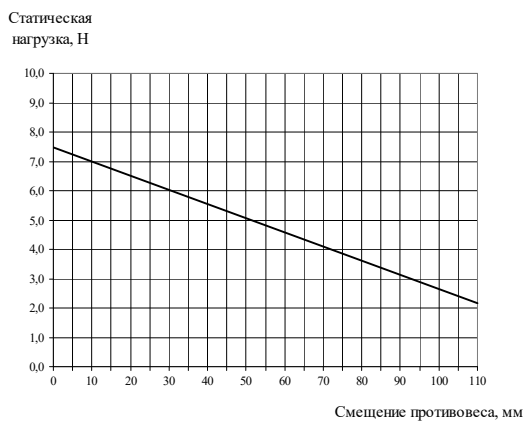


Рис. 3.12. Зависимость статической нагрузки на заготовку от положения регулируемого противовеса

3.4. Последовательность выполнения экспериментов

Распиливаю подвергались образцы в виде кубика с размером ребра, равным 5 мм. Для их ориентации относительно распиловочного диска к концу одной из оправок с помощью резьбового соединения прикреплялся фланец, в котором был выполнен квадратный паз с размером стороны, равным 6 мм (рис. 3.13). Заготовки вклеивались в паз с помощью специального состава, способного выдерживать значительные температуры в зоне обработки. Компонентами состава являлись: медицинский гипс, костный клей, керосиновый клей и вода в равных пропорциях. После установки в паз фланца заготовки, убирались остатки клеящей массы и кассеты с оправками помещались на 15–17 мин в сушильный шкаф, нагретый до температуры 100⁰ С. После сушки проверялась правильность установки корунда в пазу фланца, а затем происходила ориентация оправки с заготовкой согласно схеме, приведенной на рис. 3.14.



а



б

Рис. 3.13. Фотографии общего вида оправки для крепления распиливаемых заготовок: а – вид сбоку; б – вид сверху

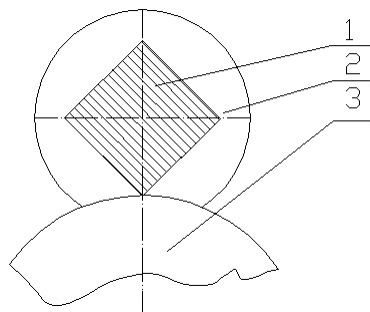


Рис. 3.14. Схема ориентации распиливаемого образца относительно режущего инструмента: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – ориентирующая оправка; 3 – распиловочный диск

Следует отметить, что подобная ориентация «на ребро» характерна для процесса механического распиливания монокристаллов алмаза.

Операция разделения заготовок из синтетического корунда, по аналогии с разделением монокристаллов алмаза, проводилась с помощью распиловочных дисков, используемых на РАУП ГПО «Кристалл». Взятый из одной партии распиловочный диск закреплялся в шпиндельном узле и приводился во вращение, в процессе которого острым лезвием твердосплавной пластины уменьшали его радиальное биение. После этого диск останавливался, и к нему подводилось ребро заготовки на расстояние 1-2 мм от режущей кромки. Инструмент приводился во вращение, и происходила плавная подача образца до момента его соприкосновения с диском. Затем включался секундомер типа «Агат» и фиксировалось время начала обработки. Следует отметить, что в отличие от распиливания монокристаллов алмаза, вследствие меньшей твердости материала заготовки, операцию подреза опускали.

В ходе проведения опытов были приняты три режима виброударного распиливания, параметры которых приведены в таблице 3.2.

Необходимо отметить, что первый режим работы вибратора соответствует резонансному, чем объясняется значительная величина амплитуды колебательных смещений заготовки.

Таблица 3.2 – Основные параметры центробежного вибратора для трех режимов его работы

Режим работы вибратора	Частота вращения вала электродвигателя, мин ⁻¹	Частота колебаний заготовки, Гц	Амплитуда колебаний заготовки, мкм	Амплитуда колебательной скорости, м/мин	Амплитуда колебательного ускорения, м/с ²
1	2480	41,3	87,4	1,36	5,88
2	5110	85,2	32,4	1,04	9,28
3	6000	100	25,3	0,95	9,98

Это приводит к максимальному значению амплитуды колебательной скорости, среди использованных режимов, а так как явление резонанса распиловочной секции наблюдается при сравнительно низкой частоте вынужденных колебаний, то данному режиму соответствует минимальная амплитуда колебательного ускорения. Второй режим соответствует двойному резонансу на области амплитудно-частотной характеристики установки. При третьем режиме наблюдается максимальная скорость вращения центробежного вибратора и, соответственно, наибольшая частота вынужденных колебаний. Это приводит к увеличенному по сравнению с остальными режимами значению амплитуды колебательного ускорения. Малая амплитуда, наблюдаемая при максимальных частотах возбуждаемых колебаний, приводит к снижению значения амплитуды колебательной скорости.

Подача заготовки на распиловочный диск, по аналогии с обработкой алмаза, проводилась по мере распиливания обрабатываемой заготовки. В конце обработки, для уменьшения вероятности скола материала на выходе, подачу, путем поворота регулировочного винта, прекращали, и опускание заготовки на режущий инструмент происходило за счет погружения острого края регулировочного винта в упругую прокладку.

Учитывая, что материал обрабатываемой заготовки тверже материала режущего инструмента, для осуществления распиливания в процессе обработки торцевая поверхность последнего шаржировалась с помощью специального приспособления (рис. 3.15) смесью алмазного порошка АСН 20/14 и касторового масла.



Рис. 3.15. Фотография приспособления для шаржирования торцевой поверхности распиловочного диска в процессе обработки

Подшаржирование торцевой поверхности распиловочного диска как при традиционной обработке, так и при сообщении заготовке вынужденных колебаний проводили каждые 5 мин работы режущего инструмента. Все испытания по распиливанию осуществлялись при нескольких значениях статической нагрузки $P_{ст}$ на распиловочный диск, равных 2,11; 3,06; 4,00 Н. Контроль значения статической нагрузки до и после обработки осуществлялся по методике, описанной выше.

В ходе экспериментов поддерживалась постоянная частота вращения распиловочного диска, т. е. распиливание производилось с постоянной скоростью резания $V = 45$ м/с. Значение скорости резания определялось путем измерения частоты вращения шпинделя с распиловочным диском. Для данной цели использовался стробоскопический тахометр типа ЗТСт-М.

В конце обработки подачу заготовки, путем поворота регулировочного винта, прекращали, и опускание заготовки на режущий инструмент происходило по мере внедрения острого края опорного винта в упругую прокладку. Это делалось с целью предотвращения скола материала заготовки на выходе распиловочного диска. После разделения образца фиксировали время окончания операции и вычисляли ее продолжительность. Затем режущий диск снимался для контроля его поверхности. Следующий образец распиливался новым диском из той же партии.

3.5. Теоретические исследования процесса механического распиливания сверхтвердых кристаллов в условиях виброударного режима распиливания

Для теоретической оценки степени влияния вынужденных колебаний заготовки на основные показатели процесса распиливания сверхтвердых кристаллов, на примере монокристаллов алмаза, необходимо, в первую очередь, получить зависимости, описывающие закон движения заготовки при сообщении ей вынужденных колебаний, оценить амплитудно-частотные характеристики разработанной распиловочной стрелы для различных режимов работы вибратора. Затем, основываясь на полученных результатах, определить значения усилий, действующих в зоне обработки при виброударном режиме распиливания. После чего разработать математическую модель процесса распиливания, на основе которой провести теоретическую оценку влияния вынужденных колебаний заготовки на интенсивность распиливания и качество обработанных поверхностей. С учетом полученных результатов представить особенности механизма хрупкого разрушения материала заготовки в зоне его взаимодействия с режущим инструментом и дать экспериментальную оценку значений удельных работ разрушения-образования малых частиц из материала образцов.

Необходимо обратить внимание на опыт, наработанный в технологии обработки строительного камня, в частности, при его распиливании, как основной режущей операции технологического процесса. В исследованиях [112] получены кинематические зависимости параметров работы алмазного инструмента для распиливания облицовочного и строительного камня. Получены данные, касающиеся распределения различных фракций зерен алмазного порошка в составе режущего инструмента и их влияние на производительность процесса распиливания. Кроме того, исследован размер продуктов разрушения при обработке алмазным инструментом для различных режимов резки камня. Авторами даны аналитические зависимости сил, возникающих при резании. Известны работы [98], в которых дается описание механизма распиливания каменных блоков штрипсовыми пилами со свободным абразивом. По мнению авторов, с учетом кинематики движения режущего инструмента и характера действующих сил, в основе обработки лежит вибрационно-

абразивный процесс. Однако, в отличие от процесса распиливания кристаллов алмаза, обработка штрипсовыми пилами характеризуется низкой скоростью резания (1,5–2 м/с) и возвратно-поступательным движением инструмента.

Таким образом, несмотря на накопленный предшествующими исследованиями опыт по использованию вынужденных колебаний в процессах резания различных материалов, следует отметить, что в силу специфических особенностей распиливания сверхтвердых кристаллов, включая монокристаллы алмаза, практически отсутствуют данные, позволяющие провести теоретическое исследование процессов виброударного резания, дать оценку степени влияния вынужденных колебаний на производительность и качество распиливания заготовок.

Подобные задачи, применительно к механической обработке металлов с колебаниями различной частоты, рассматривались в работах [103, 113, 114].

Однако в этих исследованиях речь шла об обработке металлов, когда в процессе резания происходят упругопластические деформации, а роль колебаний анализируется с точки зрения их влияния на протекание этих деформаций. Основное внимание авторами уделялось основным факторам, влияющим на производительность резания металлов и качество обработанной поверхности при сообщении вынужденных колебаний, а именно, изменению формы стружки, уменьшению средней силы резания при вибрационной обработке, снижению температуры в зоне обработки и износу режущей кромки инструмента.

В частности, в работе [103] были рассмотрены все существующие типы источников колебаний и предложена их классификация в зависимости от частоты колебаний и характера их воздействия на условия стружкообразования. Автором установлено, что колебания, частота которых не превышает 200 Гц, оказывают лишь количественное изменение условий стружкообразования (колебание скорости резания, рабочих углов и сечения срезаемого слоя из-за дополнительного вибрационного движения инструмента), а также определяют различные условия образования стружки по мере движения резания.

Качественное изменение условий стружкообразования можно разделить на два вида в зависимости от частоты вынужденных ко-

лебаний. Первый вид характеризуется образованием отдельного элемента стружки, происходящим с переменной скоростью и углами резания при частоте колебаний режущего инструмента $f = 3000\text{--}5000$ Гц. Второй вид качественных изменений стружкообразования характеризуется изменением процесса пластического деформирования и разрушения. Как отмечают авторы, данные явления происходят при ультразвуковой частоте колебаний режущего инструмента. Дальнейшее развитие исследований ультразвукового воздействия на процессы обработки материалов проведены в работе [113].

Однако все приведенные выше работы касались, в основном, обработки упругопластических материалов. Кроме того, авторы рассматривали колебательные системы замкнутого типа, в отличие от предложенной выше конструкции распиловочной секции с центробежным вибратором. Поэтому их рекомендации об использовании вынужденных колебаний переносить на процессы распиливания сверхтвердых кристаллов без учета специфики обрабатываемого сырья не представляется возможным.

3.5.1. Разработка математической модели для исследования кинематики и динамики взаимодействия элементов колебательной системы «заготовка–распиловочный диск»

Цель данного раздела заключалась в математическом описании законов движения распиловочной стрелы с центробежным вибратором, и определении усилия контактного взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемой заготовки при сообщении последней вынужденных колебаний.

Для этого воспользуемся математической моделью, позволяющей исследовать кинематику и динамику взаимодействия элементов колебательной системы «заготовка–распиловочный диск» (рис. 3.16).

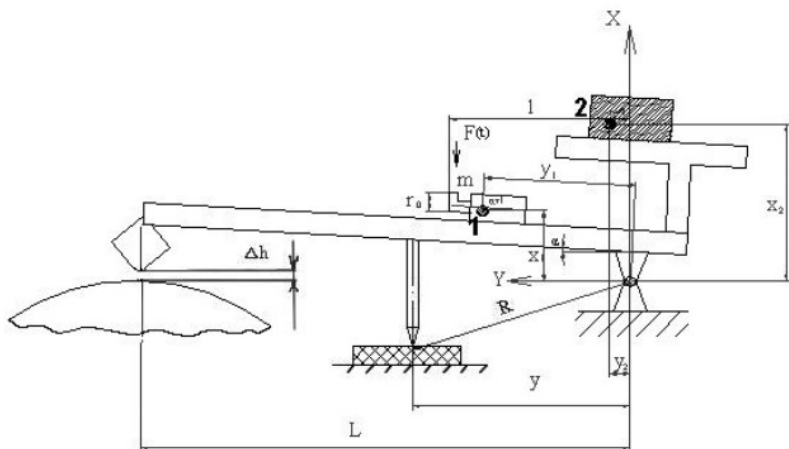


Рис. 3.16. Схема распиловочной секции модернизированного станка мод. ШП-2

С целью упрощения расчетов, заменим действие центробежного вибратора вынуждающей гармонической силой $F(t)$. Это, согласно [115], вполне допустимо, так как амплитуда создаваемых вибратором колебаний гораздо меньше, чем радиус движения неуравновешенной массы. Стрелу в шарнирном устройстве считаем закрепленной таким образом, что колебаний в направлении оси, перпендикулярной плоскости рисунка не происходит. Стрелу для упрощения расчетов считаем абсолютно жесткой. Касание опорного винта упругого основания происходит раньше касания кристалла распиловочного диска. Равновесным состоянием системы считаем положение распиловочной стрелы, при котором происходит контакт кристалла с распиловочным диском и прогиб инструмента под действием силы тяжести системы. Опорный винт упирается в упругое основание. Массу стрелы, вибратора и устройства для создания статической нагрузки на кристалл для упрощения расчетов заменим двумя сосредоточенными массами (на рис. 3.16 это точки 1 и 2). Примем за начало координат ось поворота распиловочной стрелы. Ниже приведена расшифровка использованных обозначений:

α – угол, определяющий положение коромысла, т. е. это угол между образующей распиловочной стрелы и линией, соединяющей

ось вращения стрелы с точкой контакта кристалла с распиловочным диском, в направлении против часовой стрелки;

m – масса эксцентрика;

m_1 – масса системы (кроме противовеса);

m_2 – масса противовеса;

k_1 – упругость демпфера;

k_2 – упругость опоры «кристалл–распиловочный диск»;

ξ – эффективный коэффициент демпфирования.

Тогда, с учетом использованных обозначений и геометрических параметров распиловочной секции с центробежным вибратором, приведенных на рис. 3.16, момент инерции I системы относительно оси вращения, можно принять как

$$I = m_1(x_1^2 + y_1^2) + m_2(x_2^2 + y_2^2). \quad (3.2)$$

Угол α_e между контактом упора в демпфер и контактом кристалла с распиловочным диском вычислим как

$$\alpha_e = -\frac{\Delta h}{L},$$

где Δh – высота кристалла над распиловочным диском в момент начала контакта упора с демпфером.

Тогда уравнение равновесия системы будет иметь вид

$$(m_1 y_1 + m_2 y_2)g = \left(\alpha_0 + \frac{\Delta h}{L}\right)k_1 y^2 + \alpha_0 k_2 L^2, \quad (3.3)$$

где α_0 – угол равновесного положения.

Отсюда

$$\alpha_0 = \frac{(m_1 y_1 + m_2 y_2)g - \frac{\Delta h k_1 R y}{L}}{k_1 y^2 + k_2 L^2}. \quad (3.4)$$

Вынуждающую силу представим в виде

$$F(t) = mr_0(2\pi\nu)^2 \sin(2\pi\nu t). \quad (3.5)$$

Тогда вынуждающий момент силы будет равен

$$Me(t, \nu) = mr_0 l(2\pi\nu)^2 \sin(2\pi\nu t). \quad (3.6)$$

Результирующий момент действующих сил (масса плюс реакция опор), в зависимости от величины $\delta = \alpha - \alpha_0$, т. е. углового отклонения положения коромысла от равновесного положения, определится как

$$\hat{M}(\sigma) = \begin{cases} -\sigma(k_1 y^2 + k_2 L^2) & \text{для } \sigma \geq -\alpha_0, \\ \alpha_0 k_2 L^2 - \sigma k_1 y^2 & \text{для } \sigma < -\alpha_0. \end{cases} \quad (3.7)$$

Составим уравнение движения системы

$$I\ddot{\sigma} = \hat{M}(\sigma) - \xi\dot{\sigma} + Me(t, \nu). \quad (3.8)$$

Сделаем замену переменных

$$Y_1 = \dot{\sigma}, Y_0 = \sigma, \dot{Y}_0 = Y_1. \quad (3.9)$$

Тогда (3.8) с учетом (3.9) будет иметь вид

$$\dot{Y}_1 = \frac{1}{I}[\hat{M}(Y_0) - \xi Y_1 + Me(t, \nu)]. \quad (3.10)$$

Для малой возмущающей силы (малых m , таких, что угол отклонения от горизонтали колеблющейся стрелы не превышает α_0) существует аналитическое решение.

В этом случае уравнение (3.8) можно записать в виде

$$I\ddot{\sigma} + \xi\dot{\sigma} + (k_1 Y^2 + k_2 L^2)\sigma = Me(t, \nu), \quad (3.11)$$

где $Me(t, v)$ удобнее представить как

$$Me(t, v) = mr_0 l (2\pi v)^2 \exp^{i2\pi vt}. \quad (3.12)$$

Решение для установившегося режима определим как

$$\delta(t) = A \exp^{i2\pi vt}. \quad (3.13)$$

Подставим (3.13) в (3.11) с учетом (3.12), получим

$$-A(2\pi v)^2 I + i2\pi v \xi A + (k_1 Y^2 + k_2 L^2) A = mr_0 l (2\pi v)^2. \quad (3.14)$$

Отсюда

$$A = \frac{mr_0 l (2\pi v)^2}{(k_1 Y^2 + k_2 L^2 - (2\pi v)^2 I + 2\pi v \xi i)}. \quad (3.15)$$

Из (3.15) находим

$$|A| = \frac{mr_0 l (2\pi v)^2}{\sqrt{k_1 Y^2 + k_2 L^2 - ((2\pi v)^2 I)^2 + (2\pi v \xi)^2}}. \quad (3.16)$$

Резонансная частота будет равна

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1 Y^2 + k_2 L^2}{I}}. \quad (3.17)$$

Для случая большой возмущающей силы (масса m такова, что угол отклонения от горизонтали колеблющейся стрелы превышает α_0 , т. е. реализуется виброударный режим распиливания) решение (3.8) получается численным методом. Теоретически полученные траектории движения распиловочной стрелы для описанной выше модели представлены на рис. 3.17.

Необходимо отметить, что частоты вынужденных колебаний, для которых получены траектории движения в случае отрыва заготовки от распиловочного диска (рис. 3.17, б, д, з), соответствуют частотам виброударных режимов 1–3, использованных в исследованиях при обработке.

Из представленных графиков видно, что в случае малой неуравновешенной массы вибратора за промежуток времени, равный приблизительно 0,4 с, происходит установление стабильного режима движения системы при плавном увеличении амплитуды колебаний распиловочной стрелы. При виброударном режиме взаимодействия торцевой поверхности распиловочного диска и обрабатываемой заготовки за аналогичный промежуток времени, равный приблизительно 0,4 с, происходит установление колебаний, однако увеличение амплитуды происходит не плавно, а состоит из ряда неповторяющихся циклов колебаний, в каждом из которых происходит резкое увеличение амплитуды один (рис. 3.17, д) или два раза (рис. 3.17, б).

Затем, с увеличением времени работы вибратора, система начинает характеризоваться стабильными циклами повторяющихся колебаний, которые для виброударного режима 2 (рис. 3.17, д) напоминают по форме букву М (рис. 3.18).

Очевидно, что это связано со значением частоты вынужденных колебаний при виброударном режиме 2 распиливания, равным двойной резонансной частоте распиловочной секции. В результате пики амплитуды колебаний характеризуют резонанс системы станка на основной частоте, а небольшие увеличения амплитуды между ними вызваны работой вибратора на увеличенной частоте. При воздействии на распиловочную стрелу возмущающей силы с частотой, равной 100 Гц (виброударный режим 3), наблюдается увеличение амплитуды колебаний на начальном этапе работы вибратора (рис. 3.17, з). Однако, в отличие от виброударных режимов распиливания 1 и 2, движение системы носит хаотический характер, в котором присутствуют области, как увеличенной амплитуды колебаний, так и сменяющие их участки с низким уровнем вибрации системы.

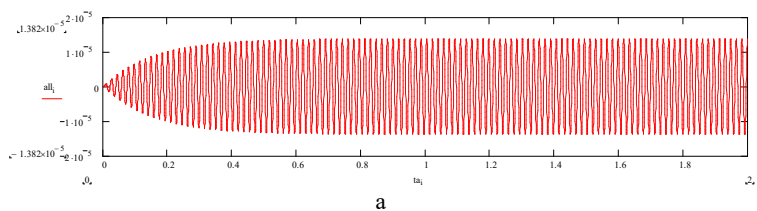
Перемещение вибратора по распиловочной стреле в сторону обрабатываемой заготовки (рис. 3.17, в, е, и) приводит к значительному уменьшению амплитуды колебаний (до 10 раз), что вызвано

уменьшением отношения расстояний L_2/L_1 , где L_1, L_2 – соответственно, расстояния от оси поворота распиловочной стрелы до места крепления вибратора и места крепления заготовки (см. рис. 3.11). Уменьшение возмущающей силы на распиловочную стрелу со стороны работающего вибратора особенно хорошо заметно на рис. 3.17, и, где, по сравнению с траекторией движения системы с расположением вибратора ближе к оси поворота распиловочной стрелы при максимальной скорости вращения неуравновешенной массы вибратора (рис. 3.17, з), реализуется стабильный режим колебаний с высокой их частотой, однако их амплитуда оказывается на порядок ниже.

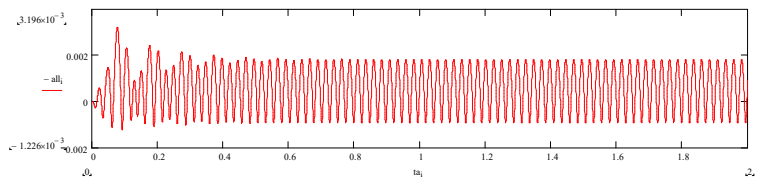
Увеличение массы системы (например, при применении электродвигателей больших габаритов) будет увеличивать ее инерционность, что приводит к уменьшению частоты колебаний распиловочной стрелы и снижению ее амплитуды (рис. 3.17, г, ж, к).

На основании разработанной схемы станка мод. ШП-2 были получены (рис. 3.19) амплитудно-частотные характеристики распиловочной секции с центробежным вибратором для различных значений его неуравновешенной массы.

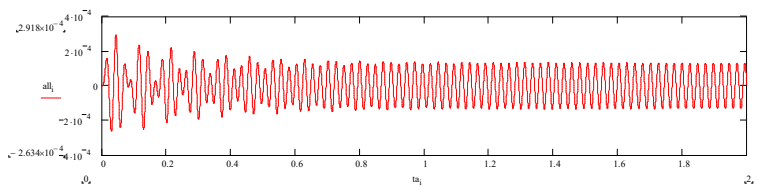
Необходимо отметить, что на рис. 3.19 штриховой линией отмечена амплитудно-частотная зависимость, получаемая при безударном режиме работы распиловочной секции. Она характеризуется наличием ярко выраженного резонанса при частоте вынуждающих колебаний порядка 57 Гц.



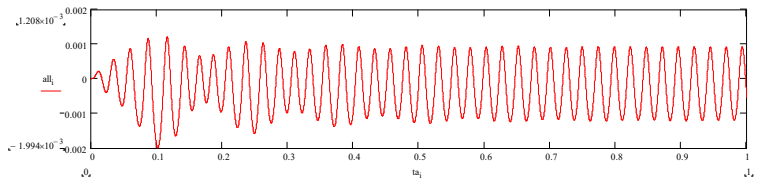
а



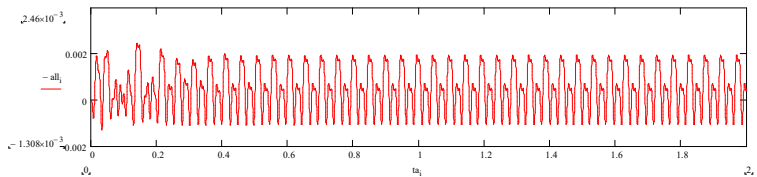
б



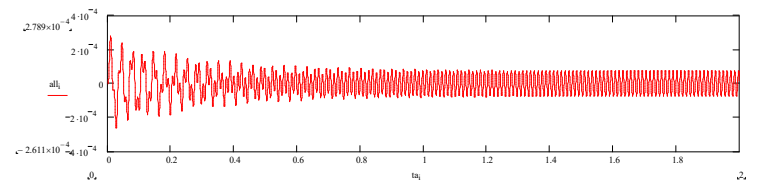
В



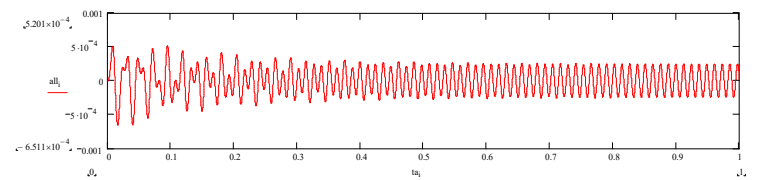
Г



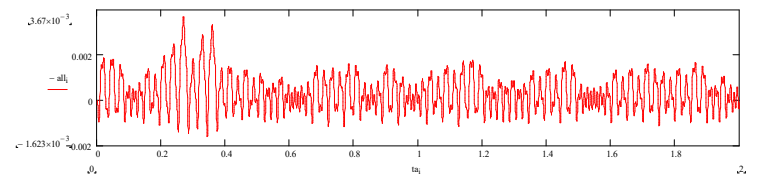
Д



е



Ж



З

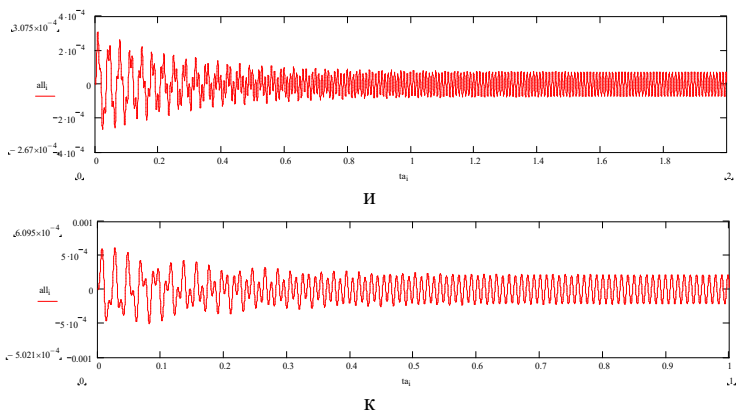


Рис. 3.17. Изменение по времени амплитуды колебаний A в метрах распиловочной секции станка при различных значениях: частоты вынуждающих колебаний: а – для безударного режима обработки при теоретической резонансной частоте $\nu_0 = 57$ Гц; б, в, г – 41 Гц; д, е, ж – 85 Гц; з, и, к – 101 Гц; смещения вибратора относительно оси поворота распиловочной стрелы: б, д, з – смещение $y_1 = 0.17$ м; в, е, и – смещение $y_1 = 0.37$ м; массы системы б, д, з – масса $m_1 = 0,45$ кг; г, ж, к – масса $m_1 = 1,45$ кг

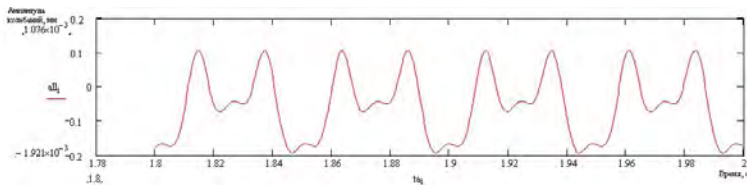
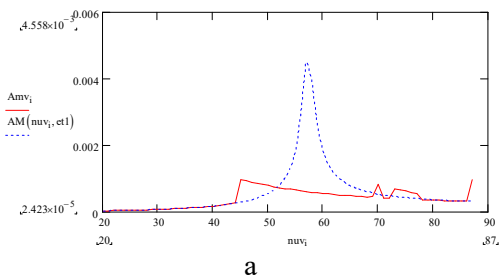
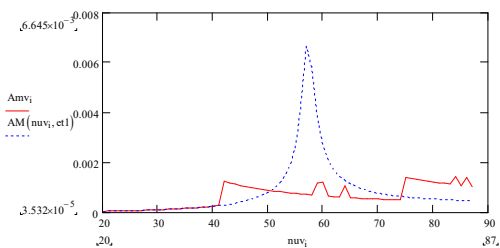


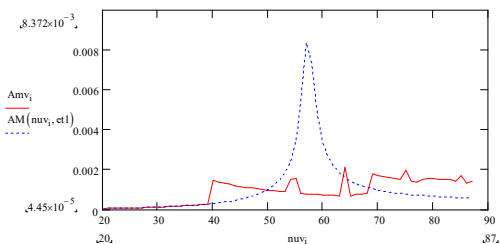
Рис. 3.18. Форма вынужденных колебаний распиловочной стрелы при виброударном режиме 2 распиливания



а



б



в

Рис. 3.19. Зависимость амплитуды вынужденных колебаний распиловочной секции от частоты вращения центробежного вибратора для различных значений неуравновешенной массы: а – 3,43 г; б – 5 г; в – 6,3 г

В случае реализации виброударного режима распиливания происходит изменение характера кривой АЧХ. Форма кривой АЧХ, теоретически полученная из разработанной схемы станка модели ШП-2, напоминает экспериментальную АЧХ, снятую на разработанном макете распиловочной секции с центробежным вибратором и представленную на рис. 3.6. Из рис. 3.19 видно, что при низких значениях частоты работы вибратора происходит плавное увеличение амплитуды до первого пика, приходящегося на диапазон частот 40-45 Гц. Затем следует несколько пиков амплитуды на частотах, порядка 55-65 Гц, а за ними начинается область повышенной амплитуды колебаний в зоне частот, приблизительно соответствующих двойной резонансной частоте системы. Отметим, что при увеличении неуравновешенной массы центробежного вибратора происходит смещение амплитудных пиков АЧХ системы в сторону более низких частот, причем эти пики становятся более ярко выраженными.

Анализ полученных в исследованиях результатов позволяет выбрать оптимальные параметры центробежного вибратора (увеличение неуравновешенной массы позволяет повысить амплитуду колебаний как в резонансном режиме и кратных ему, так и в переходных режимах работы системы; увеличение массы вибратора снижает амплитуду и частоту вынужденных колебаний системы) и определить рациональную компоновку распиловочной стрелы (место расположения вибратора на распиловочной стреле должно быть, по возможности, ближе к оси поворота распиловочной стрелы).

3.5.2. Исследование динамики взаимодействия обрабатываемой заготовки с инструментом в условиях виброударного режима распиливания

Совершенно очевидно, что для оценки влияния виброударного режима распиливания на интенсивность процесса распиливания необходимо оценить силы, действующие со стороны распиловочного диска на обрабатываемую заготовку при их виброударном взаимодействии. На основании полученных в предыдущем разделе данных о форме траектории движения распиловочной стрелы можно сделать сравнительные выводы о значениях сил взаимодействия распиливаемых образцов и режущего инструмента для традиционного распиливания и при сообщении заготовке вынужденных колебаний. Для этого обратимся к рис. 3.20.

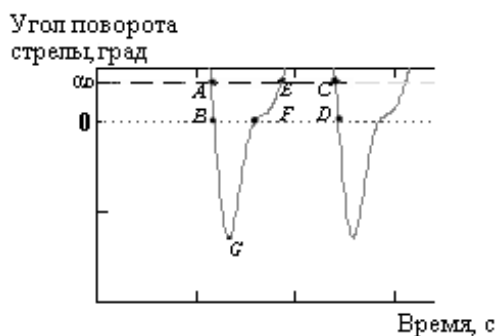


Рис. 3.20. Форма траектории движения распиловочной стрелы с обрабатываемой заготовкой в зоне ее взаимодействия с распиловочным диском

На рис. 3.20 отражена часть траектории движения распиловочной стрелы за время контакта заготовки с режущим инструментом. При этом для сравнительного анализа отражено значение равновесного угла α_0 . Это угол, характеризующий на сколько отклонится от начального положения распиловочная стрела при ее опоре на режущий инструмент, в результате чего последний, под действием силы тяжести системы, упруго деформируется. Для оценки сил, действующих в зоне обработки, исключаем пластическое деформирование распиловочного диска. Данное предположение верно, так как пластическая деформация вызывает изменение формы режущего инструмента и нарушение его плоскостности, что для процессов обработки кристаллов алмаза недопустимо. Тогда, с учетом упругой деформации распиловочного диска, сила его взаимодействия с обрабатываемой заготовкой будет пропорциональна его деформации. Таким образом, отношение сил, действующих при обычном распиливании и сообщении заготовке вынужденных колебаний, будет пропорционально отношению перпендикуляров, опущенных на прямую AE из точек B и G соответственно. Из рис. 3.20 видно, что значения сил взаимодействия образца и инструмента при виброударном режиме распиливания будут значительно выше, что вызовет увеличение глубины предразрушенного слоя в материале заготовки, приводя к увеличению интенсивности обработки.

Учитывая то, что частотный спектр возмущающей силы пересекается с областью частот, соответствующей спектральным составляющим свободных колебаний, в системе возникает явление нелинейного резонанса.

Тогда закон движения виброударной системы можно принять в виде

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi) - Jx(t), \quad (3.18)$$

где A – амплитуда, определяемая при безударном движении;
 J – импульс за время контакта Δ .

$$J = \int_{t_\alpha}^{t_\alpha + \Delta} \Phi(x, \dot{x}) dt, \quad (3.19)$$

где $\Phi(x, \dot{x})$ – сила ударного взаимодействия;

$x(t)$ – установившаяся реакция системы на силовое воздействие.

Для определения неизвестных J и ϕ зададимся начальными условиями

$$x(0) = x_0, \quad J(\alpha) = m(1 + K)x_0. \quad (3.20)$$

Тогда

$$\begin{aligned} x_0 &= A \cos \phi - Jx(0); \\ J &= [-\omega A \sin \phi - J\dot{x}(0)](1 + K)m. \end{aligned}$$

Оценка устойчивости колебаний, описываемых (3.18), и выполнения условий $x \leq x_0, J \geq 0$ производится после задания параметров системы на основе энергетической функции

$$E(J, \phi) = E_1(J, \phi) - E_2(J, \phi),$$

где $E_1(J, \phi)$ – работа сил внешних источников;

$E_2(J, \phi)$ – работа диссипативных сил.

В работе [116] было показано, что неравенство

$$\left. \frac{dE}{dJ} \right|_{\substack{J=J_0 \\ \phi=\phi_0}} = \left(\frac{\partial E}{\partial J} + \frac{\partial E}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial J} \right) \Big|_{\substack{J=J_0 \\ \phi=\phi_0}} > 0, \quad (3.21)$$

является достаточным условием неустойчивости рассматриваемой системы при

$$J = J_0, \quad \phi = \phi_0.$$

Задавая зависимости частоты колебаний от величины ударного импульса, можно получить, что в зависимости от знака x_0 , свободные периодические колебания меняют свой характер. Так, при $x_0 > 0$ с увеличением ударного импульса (т.е. с увеличением полной энергии системы) частота колебаний возрастает. При $x_0 < 0$, с ростом ударного импульса частота колебаний уменьшается. При $x_0 = 0$ пе-

риодические колебания, вне зависимости от ударного импульса, возможны лишь в конечном числе фиксированных частот.

Наиболее интенсивные резонансные режимы, близкие к свободным, существенно отличаются от собственных частот системы, поэтому первый член в правой части (3.18) существенно меньше второго. Пренебрегая им, имеем приближенное решение для резонансных виброударных режимов

$$x(t) = -Jx(t). \quad (3.22)$$

При $x(0) = x_0$ имеем $J = -\frac{x_0}{x(0)}$ и $x(t) = \frac{\Delta}{x(0)}x(t)$.

Выражение (3.22), при малых уровнях демпфирования внешнего воздействия, описывает однозначные резонансные режимы системы.

Полагая $P(t) = P \cos(\omega t + \phi)$, найдем условия существования квазирезонансных движений любой кратности 1, так как при этом балансируются работы сил трения и возбуждения.

Период этих колебаний $T = 2\pi / \omega$.

Уравнение энергетического баланса, описывающее условие поддержания резонансных режимов, имеет вид

$$E_1 = E_2 + E_3 \quad (3.23)$$

где $E_1 = \int_0^{T_1} P(t)\dot{x}(t)dt$ – работа внешнего источника;

$E_2 = \int_0^{T_1} G^{-1}[\phi_\alpha x(t)]\dot{x}(t)dt$ – потери энергии из-за наличия диссипативных членов;

$E_3 = J^2 \frac{1-K}{2m(1+K)}$ – работа сил контактного трения.

Задавая зависимости величины ударных импульсов от частоты внешнего воздействия, можно определить неустойчивые режимы системы. Известно, что при больших уровнях демпфирования и

возбуждающего воздействия, колебания не будут иметь резонансного характера.

Для систем с $x_0 > 0$, при плавном увеличении частоты внешнего воздействия, можно реализовать наиболее интенсивные виброударные режимы, которые после достижения некоторых характерных значений частот, определяемых условиями энергетического баланса, сил возбуждения и демпфирования теряют разрыв.

Для систем с $x_0 < 0$ ситуация становится обратной, причем колебания в такой системе возникают после придания ей дополнительного начального импульса. При $x_0 = 0$ наиболее интенсивные колебания возможны в окрестности полного набора частот. С ростом значений собственных частот возрастает влияние диссипативных факторов, и предельные величины ударных импульсов уменьшаются.

3.5.3. Теоретическая оценка степени влияния виброударного режима на интенсивность распиливания сверхтвердых кристаллов

В разделе 2.1.3 приведена оценка повышения производительности распиливания при сообщении обрабатываемой заготовке вынужденных колебаний.

Однако необходимо отметить, что данная оценка повышения производительности процесса была получена для идеализированных условий без учета сил сопротивления, действующих в процессе обработки. Учитывая форму распиловочного диска и плоский, без разводов профиль его торцевой поверхности, то с увеличением глубины пропила заготовки силы заклинивания, стремящиеся под действием внутренних напряжений сомкнуть пропиленные части заготовки, будут возрастать. Поэтому для более точной оценки влияния виброударного режима распиливания на интенсивность обработки необходимо установление зависимостей отражающих изменение значения импульсов $j_{ст}$ и $j_{вр}$, сообщаемых образцу параллельно оси x за единицу времени с учетом изменения сил заклинивания по глубине пропила заготовки.

С этой целью была проведена серия экспериментов с использованием следующей методики. Сначала определялся момент сил, необходимых чтобы стронуть неподвижный распиловочный диск,

внедренный на определенную глубину в заготовку. Заметим, что момент складывается из момента сил трения боковых поверхностей режущего инструмента о пропиленные части заготовки, стремящиеся за счет внутренних напряжений сжаться, и момента сил трения торца распиловочного диска о дно пропила заготовки. Второе слабое, изменяющееся по глубине пропила, непосредственно влияет на значение импульса силы сообщаемого образцу. Поэтому измерения проводились двумя сериями. В первой серии оценивался суммарный момент сил сопротивления для того, чтобы стронуть режущий инструмент. Во второй серии оценивалась непосредственно сила трения боковых поверхностей режущего инструмента о пропиленные части заготовок. Затем, из полученных в первой серии значений экспериментов вычитались значения, полученные во второй серии.

Для оценки момента сил, необходимых чтобы стронуть неподвижный распиловочный диск, использовалась следующая методика. На фланце распиловочного шпинделя, на котором устанавливался режущий инструмент, была жестко закреплена стальная пластина, имеющая большое количество отверстий малого диаметра. К ней через трособлочную систему периодически присоединялась чаша, которую можно нагружать с помощью набора разновесов (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Общий вид установки для определения сил заклинивания по глубине распила заготовки

Затем проводилась первая серия экспериментов, в которой сначала определялся момент сил трения, действующих в графитовых подшипниках скольжения шпиндельного узла распиловочной секции. Для этого со шпинделя снимался приводной ремень, а режущий инструмент находился вне контакта с обрабатываемой заготовкой. Затем чаша трособлочной системы последовательно нагружалась набором гирь, с разницей между значениями промежуточных весов равной 1 грамму. После того как происходило трогание шпинделя под действием грузов, измерения прекращались, и фиксировался суммарный вес гирек на чаше трособлочной системы. Далее приводной шпиндель одевался на шпиндель распиловочного станка. Начинаясь процесс распиливания, причем глубина распиливания фиксировалась с помощью индикаторной головки, соединенной с оправкой заготовки. Аналогичным образом измерения моментов сопротивления производились по всей глубине распиливания заготовки с интервалом 0,5 мм. При этом после каждого этапа распиливания приводной ремень осторожно снимался. Один из концов трособлочной системы аккуратно зацеплялся с помощью небольшого крючка с одним из отверстий пластины, расположенной наиболее близко по вертикали к ее краю. Производилось нагружение чаши трособлочной системы набором промежуточных грузов. После проведения измерений из каждого значения массы, полученной при последовательном распиливании заготовки, вычиталось значение массы, полученное при измерении момента сил трения в подшипниках. Значения веса переводились в моменты сил, необходимых для того, чтобы стронуть шпиндель с режущим инструментом, внедренным на определенную глубину в заготовку. опыты проводились как при традиционном распиливании, так и при работающем во время обработки и измерения сил заклинивания вибраторе установки (при проведении опытов использовался виброударный режим 1 распиливания, характеризующийся наибольшей амплитудой вынужденных колебаний). Аналогичным образом проводилась вторая серия экспериментов, с тем лишь различием, что перед измерениями оценивалось значение статической нагрузки на кристалл по методике описанной выше. После каждой остановки распиловочного диска производилось уравнивание распиловочной стрелы с помощью другой трособлочной системы, и измерялась масса грузов, необходимых чтобы стронуть распиловочный диск.

Тем самым исключается нагрузка на распиловочный диск со стороны заготовки, что исключает из суммарного момента сил момент силы трения торцевой поверхности режущего инструмента о дно пропила заготовки. Данные измерений двух серий экспериментов (по 10 различных заготовок в каждой) для нескольких режимов распиливания, позволяющие судить об изменении значения сил заклинивания по глубине пропила, представлены на рис. 3.22. Из приведенных данных видно, что величина $M_{тр}$ по глубине пропила не остается постоянной. От момента начала обработки значение $M_{тр}$ плавно возрастает, что вызвано нарастающим воздействием сил внутренних напряжений заготовки, стремящихся прижать распиленные участки образца к боковым сторонам инструмента. Причем, как при традиционной обработке, так и при реализации виброударного режима распиливания, максимальное значение сил заклинивания происходит при глубине распиливания, составляющей порядка 60-65 % от длины диагонали заготовки. Затем следует резкое снижение момента сил трения, что вызвано прекращением действия внутренних напряжений в заготовке в заключительной фазе распиливания.

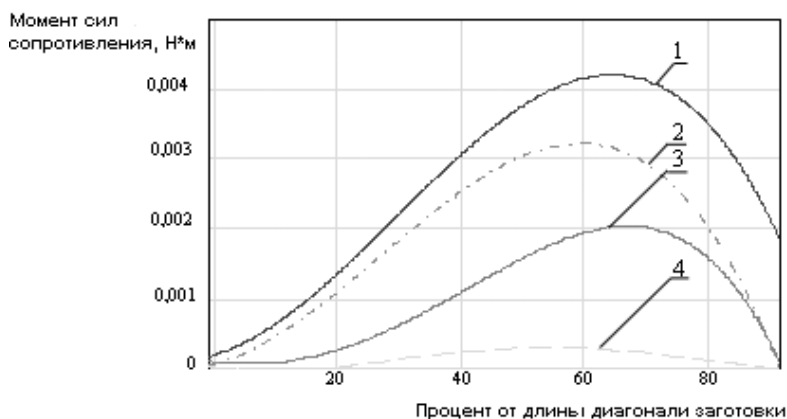


Рис. 3.22. Зависимость сил заклинивания по глубине пропила относительно длины диагонали заготовки для различных режимов распиливания: 1, 2 – соответственно, суммарный момент сил трения для традиционного и виброударного распиливания; 3, 4 – соответственно, момент сил трения о боковые поверхности распиловочного диска для традиционного и виброударного распиливания

Таким образом, различие соответствующих значений, полученных в первой и во второй серии экспериментов, определяет изменение значения импульсов сил $j_{ст}$ и $j_{вр}$ по глубине заготовки. Вычисленные зависимости моментов трения аппроксимировались степенными функциями, переводились в импульсы сил и вычитались из значений $j_{ст}$ и $j_{вр}$. Полученные функции от глубины пропила подставлялись в дифференциальные уравнения (3.5) и (3.21) и решались численным методом. Найденные зависимости позволяют дать более точную оценку изменения глубины пропила заготовки от времени обработки для традиционного распиливания и при сообщении заготовке вынужденных колебаний.

На рис. 3.23 приведены зависимости глубины пропила заготовки от времени обработки. Видно, что под действием вынужденных колебаний скорость перемещения режущей кромки диска относительно заготовки возрастает, а, соответственно, время распиливания кристалла $\tau_{вр}$, по сравнению с продолжительностью обработки в обычных условиях $\tau_{ст}$, сокращается.

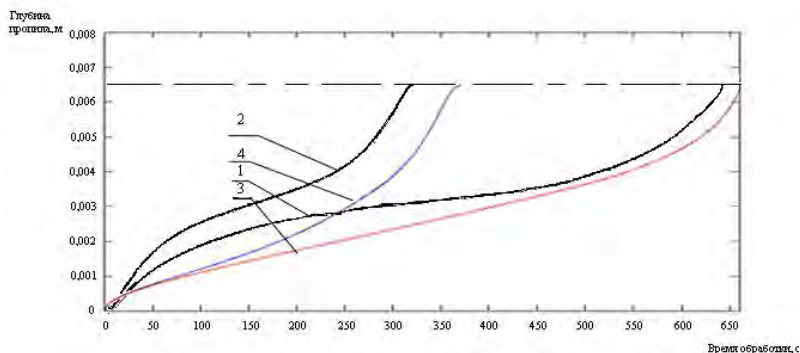


Рис. 3.23. Зависимость глубины пропила от времени распиливания в обычных условиях и при виброударном режиме распиливания при $A_0/2x_{ст} = 4$ ($V_0 = 45$ м/с; $h = 60$ мкм; $\alpha = 0,9$; $a = 4,5$ мм; $\gamma_{ст} = 1$; $\gamma_{вр} = 0,65$): 1 – традиционное распиливание без учета сил заклинивания по глубине обработки; 2 – распиливание с сообщением заготовке вынужденных колебаний без учета сил заклинивания по глубине обработки; 3 – традиционное распиливание с учетом сил заклинивания по глубине обработки; 4 – распиливание с сообщением заготовке вынужденных колебаний при учете сил заклинивания по глубине обработки

Кроме того, в случае использования значений импульсов сил $j_{ст}$ и $j_{вр}$ постоянными, зависимости $b(t)$ как для обычной обработки, так и при реализации виброударного режима распиливания являются антисимметричными (нечетными) относительно половины глубины заготовки. В случае учета увеличения сил заклинивания в образце, скорость перемещения режущей кромки диска относительно заготовки снижается для обоих видов обработки. Это приводит к увеличению времени обработки заготовки. Данное снижение производительности особенно заметно на этапе распиливания первой половины образца, где происходит увеличение сил заклинивания. В конечной фазе обработки соответствующие кривые при увеличении глубины пропила становятся параллельными (рис. 3.23). Это свидетельствует о том, что характер перемещения режущей кромки диска, а, следовательно, и интенсивность обработки становится одинаковыми, как с учетом, так и без учета сил заклинивания для одинаковых видов обработки (традиционное распиливание и распиливание с сообщением заготовке вынужденных колебаний), что вызвано резким снижением сил заклинивания в конце распиливания (рис. 3.22).

3.5.4. Исследование особенностей механизма разрушения хрупких материалов в условиях виброударного режима распиливания

Как известно [117, 118], путем введения в зону резания вынужденных колебаний можно, за счет изменения направления их действия и интенсивности, существенным образом влиять на выходные показатели процесса обработки. При этом установлено, что интенсифицирующее воздействие таких колебаний на повышение производительности и изменение шероховатости поверхности обработанных образцов проявляется только при реализации виброударного режима распиливания. В этом случае взаимодействие торцевой поверхности распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой характеризуется периодическим разрывом их контакта с последующим соударением. Одновременно с этим изменяются условия взаимодействия боковых поверхностей распиловочного диска с уже пропиленной поверхностью заготовки, что обусловлено наличием их относительных колебательных (дополнительных) смещений,

действующих в плоскости контакта и направленных вдоль радиуса диска. Отмеченные особенности виброударного режима распиливания вызывают изменения в механизме разрушения материала заготовки, что, в свою очередь, приводит к изменению условий формирования шероховатости на их обработанных поверхностях.

В работе [119] показано, что на условия формирования шероховатости пропиленной поверхности влияет механическое взаимодействие торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска с заготовкой в контактных зонах, прилегающих к его кромкам, в процессе чего происходит скалывание (хрупкое разрушение) частиц материала заготовки, и на пропиленной поверхности возникают микронеровности, формирующие так называемую первоначальную шероховатость.

О значении параметров первоначальной шероховатости обрабатываемой поверхности заготовки косвенно можно судить по размерам частиц ее материала в продуктах разрушения. Очевидно, чем они больше, тем выше степень повреждения материала заготовки в контактных зонах, прилегающих к кромкам распиловочного диска, а, соответственно, выше значение формируемой в этих зонах первоначальной шероховатости.

Для оценки размеров частиц, скалываемых в процессе обработки, был проведен комплекс сравнительных экспериментальных исследований по распиливанию образцов, как в обычных условиях, так и при виброударном режиме. При этом в качестве материала образцов использовалось кварцевое стекло. Выбор стеклянных образцов оправдан с точки зрения изучения продуктов разрушения, размер частиц которых больше, чем у корунда, а это упрощает как процедуру их сбора в процессе распиливания, так и повышает точность последующей оценки их геометрических параметров.

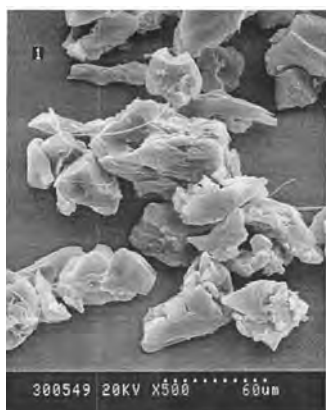
Режущим инструментом в данной серии опытов служил алмазный отрезной диск, представленный на рис. 3.24..



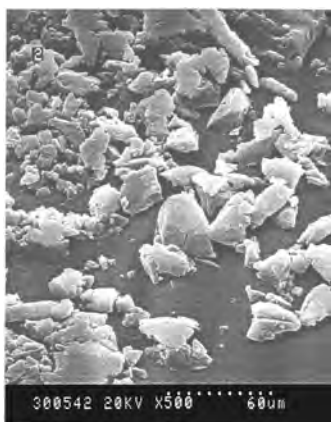
Рис. 3.24. Фотография отрезного алмазного диска

Использование режущего инструмента данного типа было обусловлено тем, что в процессе обработки для достоверности результатов необходимо получить значительное количество продуктов обработки, а это позволяет сделать значительная (1 мм) толщина диска, по сравнению с используемыми при распиливании алмаза режущими инструментами. Для сбора продуктов распиливания в процессе обработки использовался конверт, изготовленный из кальки. Данный материал, в отличие от бумаги, не оставляет на собранных образцах дополнительных включений (бумажных волокон и т.п.). Конверт для сбора продуктов обработки с помощью клейкой ленты закреплялся на распиловочной стреле вблизи зоны выброса стеклянной пыли.

На рис. 3.25 приведены фотографии продуктов разрушения стеклянных образцов при их обработке, как в обычных условиях, так и с использованием трех виброударных режимов распиливания. Отсюда видно, что наибольший средний размер стеклянных частиц наблюдается при традиционном распиливании (рис. 3.25, а), когда имеет место постоянный механический контакт торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой. Если распиливание осуществляется с сообщением заготовке вынужденных колебаний, то во всех случаях средний размер частиц в продуктах разрушения оказывается меньше, по сравнению с традиционной обработкой.



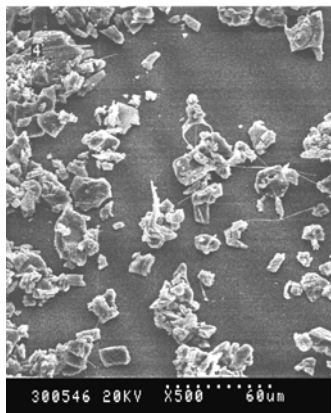
а



б



в



г

Рис. 3.25. Фотографии продуктов разрушения при распиливании стеклянных образцов: а – обычный режим работы; б – виброударный режим 1; в – виброударный режим 2; г – виброударный режим 3

Это объясняется тем, что при таком режиме распиливания взаимодействие торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой протекает в условиях их периодического соударения. В результате процесс разрушения материала заготовки происходит под действием импульсных нагрузок, что приводит к изменению параметров частиц в продуктах обработки. Как было показано выше, значения импульсных нагрузок при виброударном взаимодей-

ствии обрабатываемой заготовки и торцевой поверхности распиловочного диска в несколько раз превосходят значение статической нагрузки на образец при традиционном распиливании.

Исходя из положений теории хрупкого разрушения [96, 120], можно утверждать, что при виброударном режиме распиливания форма и размеры скалываемых с поверхности заготовки частиц, в первую очередь определяются степенью развития сети микротрещин в предразрушенном слое. Причем глубина этого слоя и степень развития микротрещин в нем определяются интенсивностью виброударного режима распиливания, которая характеризуется значениями амплитуды и частоты колебаний, сообщаемых заготовке. Необходимо отметить, что амплитуда вынужденных колебаний определяет глубину развития предразрушенного слоя, а частота – степень развития сети микротрещин в нем.

Так, при распиливании стеклянных образцов с использованием виброударного режима 1 характерно образование частиц с широким диапазоном их линейных размеров (рис. 3.25, б). При этом размер наиболее крупных частиц близок к размерам частиц, получаемых при традиционном распиливании.

Такая ситуация объясняется параметрами возбуждаемых колебаний, характерных для рассматриваемого виброударного режима распиливания. В частности, большая амплитуда колебаний обуславливает формирование на поверхности заготовки предразрушенного слоя значительной глубины, но из-за низкой их частоты степень развития микротрещин в нем оказывается невысокой. Поэтому, при распиливании в этом режиме скалывание обрабатываемого материала происходит в виде частиц, имеющих сравнительно большие размеры.

При распиливании в режимах 2 и 3 (рис. 3.25, в, г) в продуктах разрушения появляется значительное количество мелких стеклянных частиц. Это связано с тем, что с повышением частоты колебаний и уменьшением их амплитуды глубина предразрушенного слоя на заготовке уменьшается. Но одновременно с этим возрастает степень развития в нем сети микротрещин, ответственных за размеры частиц материала, скалываемых в процессе распиливания.

Таким образом, на основе полученных результатов можно утверждать, что по сравнению с традиционной, распиливание хрупких материалов при сообщении заготовке вынужденных колебаний

вызывает снижение размеров скальваемых частиц, что, соответственно, вызывает уменьшение первоначальной шероховатости поверхности заготовки.

На основании полученных данных можно также оценить соотношение значений $\gamma_{ст}$ и $\gamma_{вр}$ удельной работы разрушения заготовок. Для различных режимов обработки эти значения будут пропорциональны линейным размерам скальваемых в процессе обработки частиц. То есть, согласно полученным данным, имеет место неравенство $\gamma_{ст} > \gamma_{вр}$ для всех виброударных режимов распиливания. Кроме того, с повышением частоты вынужденных колебаний происходит снижение значения $\gamma_{вр}$.

3.6. Экспериментальные исследования процесса распиливания сверхтвердых кристаллов с применением центробежного вибратора

В настоящей главе приводятся результаты экспериментальных исследований, отражающих влияние параметров виброударного режима распиливания на производительность обработки и шероховатость обработанной поверхности в сравнении с их значениями при традиционном распиливании.

3.6.1. Влияние виброударного режима распиливания на производительность обработки заготовок из синтетического корунда

Операция распиливания заготовок из синтетического корунда выполнялась на промышленной секции распиловочного станка мод. ШП–2, используемой на РАУП ГПО «Кристалл», в конструкцию которой были внесены описанные выше изменения, позволяющие довольно просто реализовывать различные режимы обработки, в частности легко изменять амплитуду и частоту вынужденных колебаний распиловочной стрелы. Скорость резания во всех случаях оставалась постоянной и составляла 45 м/с. Увеличение этого параметра нецелесообразно, так как вызывает формирование дефектов на обработанной поверхности или разрушение распиловочного диска, а уменьшение приводит к снижению производительности обработки.

В результате проведенных опытов были получены данные, отражающие влияние принятых режимов обработки, амплитуды колебательной скорости и колебательного ускорения на производительность процесса распиливания при различных значениях статической нагрузки [121].

На рис. 3.26 приведены значения интенсивности обработки образцов в обычных условиях и при использовании трех виброударных режимов распиливания с различными значениями статической нагрузки.

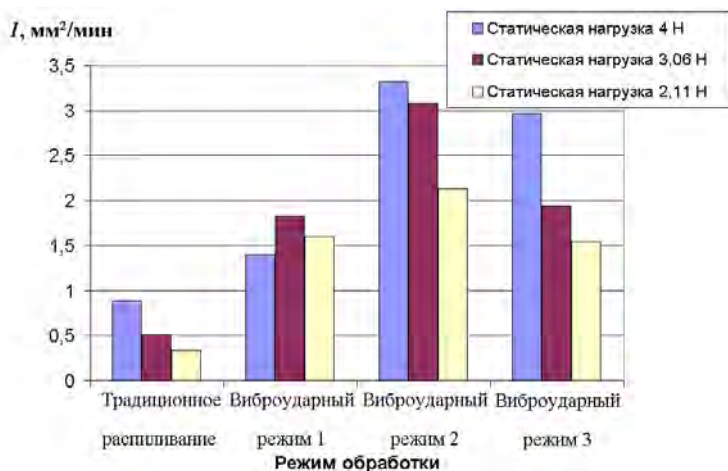
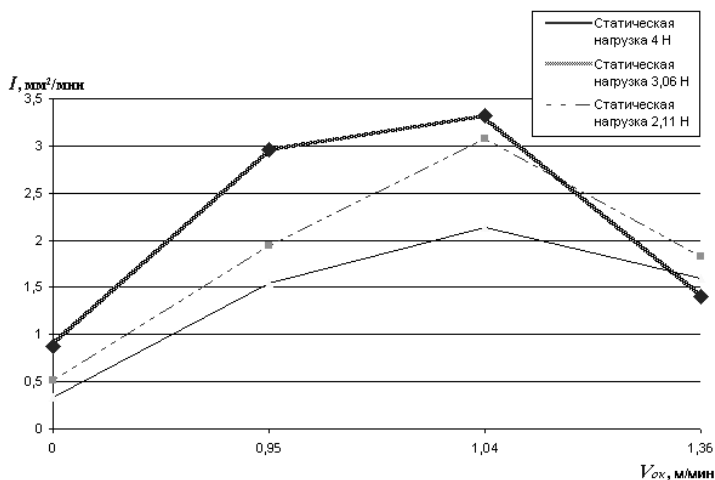


Рис. 3.26. Зависимость интенсивности распиливания заготовок из синтетического корунда от режима обработки

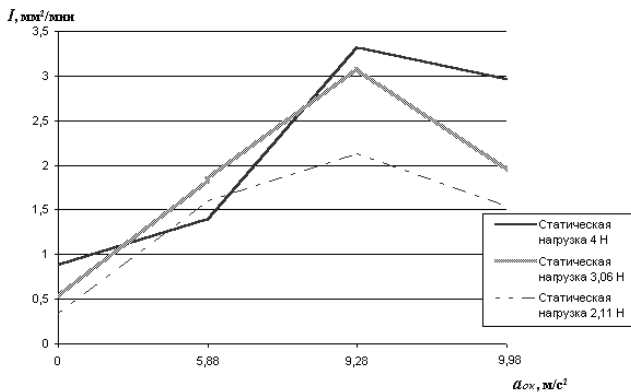
Из их анализа следует, что по сравнению с распиливанием в обычных условиях реализация виброударного режима во всех случаях повышает интенсивность распиливания. При этом наибольшее ее значение соответствует режиму 2, несколько меньшее – режиму 3, и еще меньшее – режиму 1. По мере увеличения статической нагрузки значение интенсивности распиливания как в обычных условиях обработки, так и на виброударных режимах возрастает. Исключением является режим 1, на котором при нагрузке 2,11 Н, интенсивность распиливания оказалась несколько выше по сравнению с обработкой, когда $P_{ст} = 4,00$ Н. Очевидно, такая ситуация

объясняется тем, что этот режим характеризуется наибольшей амплитудой колебательных смещений при наименьшей частоте их следования. В результате количество импульсов ударного взаимодействия в единицу времени оказывается меньше по сравнению с другими режимами. Поэтому, несмотря на то, что величина импульса на режиме 1 превышает соответствующие значения на режимах 2 и 3, интенсивность разрушения, которая обусловлена образованием вначале предразрушенного слоя, а затем его удалением при повторном ударном воздействии, оказывается меньше.

Чтобы перейти от условно принятых режимов обработки к количественным параметрам, характеризующим процесс виброударного распиливания, воспользуемся значением амплитуды колебательной скорости и амплитуды колебательного ускорения. Так, на рис. 3.27 приведены зависимости интенсивности распиливания образцов от значения амплитуды колебательной скорости (рис. 3.27, а) и амплитуды колебательного ускорения (рис. 3.27, б).



а



б

Рис. 3.27. Зависимость интенсивности I ($\text{мм}^2/\text{мин}$) процесса распиливания заготовок из синтетического корунда при различных значениях статической нагрузки: а – от амплитуды колебательной скорости $V_{ок}$; б – от амплитуды колебательного ускорения $a_{ок}$

Их анализ свидетельствует о том, что по мере увеличения амплитуды колебательной скорости значение интенсивности распиливания повышается, достигая максимального значения при $V_{ок}$ порядка 1,04 м/мин, а затем оно снижается, т. е. имеет место оптимальное для данных условий обработки значение колебательной скорости. Это связано с оптимальным значением частоты вынужденных колебаний, которая для виброударного режима 2 кратна резонансной частоте распиловочной секции с центробежным вибратором. Это приводит к установлению в системе стабильных по амплитуде колебаний (рис. 3.17, д).

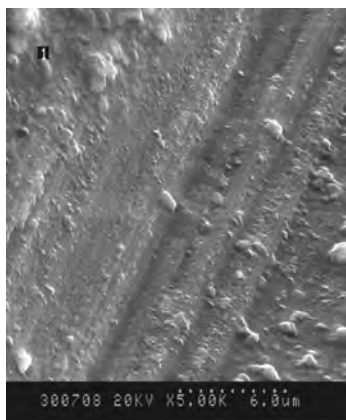
В случае использования виброударного режима 3 с частотой колебаний некратной резонансной некоторое снижение производительности обработки можно объяснить нестабильным характером колебаний распиловочной стрелы с заготовкой (рис. 3.17, з), что приводит к наличию в траектории движения системы участков с низким уровнем амплитуды колебаний, вызывая уменьшение, по сравнению с режимом 2, импульса ударной силы, необходимой для внедрения зерен и разрушения обрабатываемого материала.

Из приведенных на рис. 3.27, б зависимостей видно, что значение интенсивности распиливания от значения амплитуды колебательного ускорения при различных статических нагрузках также имеет точку перегиба, соответствующую оптимальной величине $a_{ок}$ (порядка 9,2–9,3 м/с²).

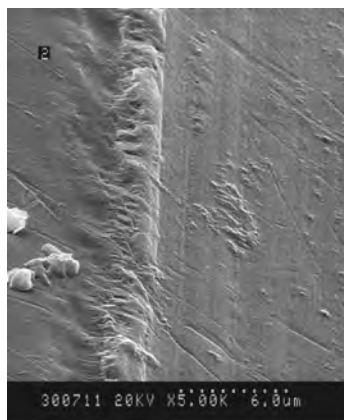
Отметим, что увеличение статической нагрузки до 4,00 Н в режиме 1 обработки при резонансных колебаниях распиловочной секции приводит к снижению производительности, по сравнению со значением статической нагрузки равным 3,06 Н. Данное обстоятельство можно объяснить следующим. Несмотря на отмеченное явление эффективного повышения жесткости инструмента при использовании вынужденных колебаний [112], значительная их амплитуда в резонансном режиме 1 приводит к увеличению ударных нагрузок на инструмент, взаимодействующий с заготовкой.

Это при максимальной статической нагрузке вызывает интенсивное дробление алмазных частиц и их внедрение в более мягкую, по сравнению с заготовкой, торцевую поверхность распиловочного диска. При вращении режущего инструмента эти зерна не перекапываются по дну пропила, а скользят по нему, вонзившись в тело диска. В результате увеличивается количество абразива не участвующего, непосредственно, в процессе резания, что приводит к снижению интенсивности процесса распиливания.

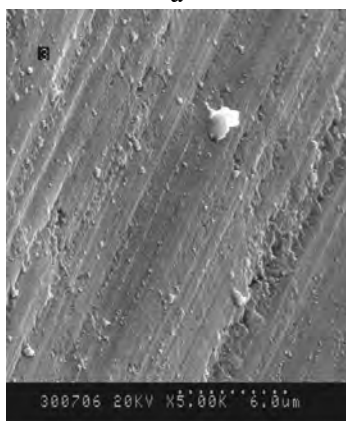
С целью установления механизма влияния амплитуд колебательной скорости и колебательного ускорения на процесс распиливания обратимся к механизму виброударного взаимодействия распиловочного диска с сверхтвердым кристаллом в присутствии свободного абразива. Для этого исследовалась топография дна пропила образца, взаимодействующего с распиловочным диском, что отражено на приведенных ниже снимках (рис. 3.28). Для фотографирования указанной поверхности образец распиливался в необходимом режиме обработки до середины диагонали. Затем уже пропиленные части корунда сошлифовывались и в результате получался участок взаимодействия заготовки и режущего инструмента, находящийся на небольшом углублении (до 1 мм) от сошлифованной поверхности. После этого образец тщательно промывался, обезжиривался, покрывался слоем сусального золота и исследовался на электронном растровом микроскопе модели «Cam Scan».



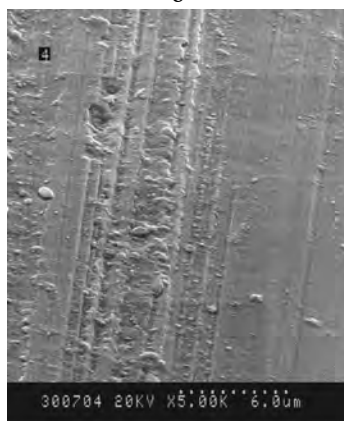
а



б



в



г

Рис. 3.28. Фотографии поверхности взаимодействия обрабатываемой заготовки с распиловочным диском: а – обычный режим работы; б – виброударный режим 1; в – виброударный режим 2; г – виброударный режим 3

Необходимо отметить, что распиливание – это микропроцесс проникновения частичек алмаза в заготовку, сопровождающийся процессами смятия и скалывания. Диск при виброударном режиме взаимодействия с заготовкой совершает колебательное движение и в крайнем верхнем положении траектории поднимается на некоторую величину над дном пропила, а в нижнем положении прижима-

ется к нему. При этом вследствие малой толщины режущего инструмента он несколько упруго деформируется (прогибается), увеличивая тем самым продолжительность контакта с материалом.

При такой схеме движения режущего инструмента при подъеме диска частицы алмаза с боковых и торцевой поверхностей режущего инструмента проникают в пропилен заготовки (рис. 3.29). При опускании инструмента находящийся под ее рабочей кромкой абразив прижимается к материалу образца. Под действием статического усилия подачи каждая алмазная частичка, передающая давление от распиловочного диска на материал, вызывает первичное разрушение, образуя на дне пропила небольшую вмятину, так называемое гнездо пластической деформации. По контуру площади смятия развивается кольцевая трещина, направленная вглубь заготовки, происходит выдавливание разрушенной его части и скалывание больших элементов.

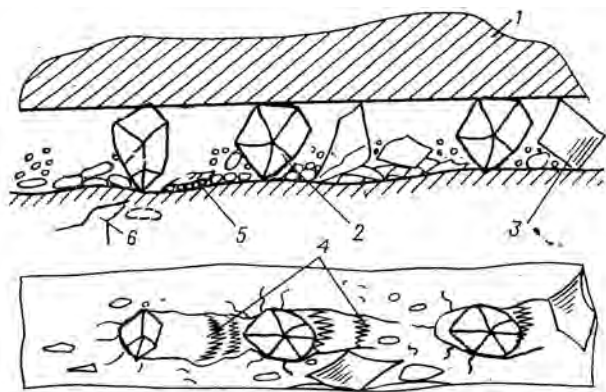


Рис. 3.29. Схема разрушения заготовки при распиливании: 1 – режущий инструмент; 2 – алмазные зерна; 3 – расколовшиеся алмазные зерна; 4 – чешуйки спрессованного материала образца; 5 – слой раздавленного материала образца; 6 – трещины

Учитывая форму инструмента, его подачу и вращение при обработке, разрушение дна пропила, как при традиционной обработке, так и при виброударном режиме распиливания, происходит в виде отдельных дорожек-следов взаимодействия распиловочного диска и материала заготовки. Из представленных фотографий (см. рис. 3.28)

видно, что при обычном режиме обработки следы ударного взаимодействия корунда с режущим инструментом в виде полос – углублений имеют нечеткие границы. Поверхность характеризуется наличием своеобразных наплывов, что, по нашему мнению, вызвано значительным размером частиц скалывающихся с поверхности образца во время обработки (рис. 3.28, а).

Вибрационное перемещение диска относительно заготовки вызывает увеличение подвижности алмазных зерен прижатых ко дну пропила. Учитывая неправильную форму частиц алмаза при использовании его в качестве свободного абразива, перекачивание абразива с переменными размерами в разных сечениях приведет к появлению дополнительных динамических нагрузок. Так, если алмазное зерно установится между инструментом и дном пропила по длинной оси, оно как бы расклинится между диском и камнем; при этом увеличится контактное давление и напряженное состояние под абразивом, произойдет более интенсивное разрушение материала заготовки. Такая же картина будет наблюдаться и при взаимодействии перемещающихся зерен с возвышениями — бугорками, находящимися на поверхности дна пропила. Данное предположение подтверждается на представленных фотографиях. Для виброударного режима 1 (рис. 3.28, б) характерна наибольшая амплитуда колебательной скорости, что вызывает повышение подвижности алмазных частиц и увеличение внедрения единичного зерна в материал заготовки. Это приводит к увеличению глубины дорожек на дне пропила. Кроме того, на приведенной фотографии поверхности заметно снижение количества бугорков в зоне обработки, что также можно объяснить увеличенной подвижностью абразива. Значительная амплитуда вынужденных колебаний вызывает большую деформацию режущего инструмента при его контакте с корундом в нижней точке траектории движения, что приводит к увеличению поперечного размера дорожек разрушения на дне пропила.

Помимо указанных динамических воздействий алмазных частиц на заготовку, необходимо учитывать также и динамический характер приложения усилий резания (диск в момент касания с камнем наносит удар по зернам). Процесс разрушения зерен прямопропорционален амплитуде колебательного ускорения. Это приводит к дроблению и измельчению алмазных частиц, которые не перекачиваются по дну пропила, а как бы скользят по нему, вонзившись в

тело режущего инструмента. В этом случае участие расколовшегося абразива в непосредственном процессе разрушения образца крайне незначительно, так как его воздействие на материал имеет характер истирания и полирования следов взаимодействия распиловочного диска и материала заготовки. Очевидно, что с возрастанием амплитуды колебательного ускорения доля частиц алмаза, полирующих дно пропила будет больше, что приведет к дополнительному сглаживанию дорожек взаимодействия и уменьшению их поперечного размера. Это подтверждается фотографиями поверхности в зоне обработки при распиливании в виброударных режимах 2 и 3 (рис. 3.28, в, г). Данные режимы, как упоминалось ранее, отличаются увеличенным значением амплитуды колебательного ускорения, что вызывает уменьшение среднего размера зерен в зоне обработки и снижение, как ширины, так и глубины дорожек пропила, по сравнению с режимом 1. Причем режим 2 отличается более высокой амплитудой колебательной скорости, а, соответственно, и более высокой подвижностью алмазных зерен в зоне обработки. Поэтому топография поверхности в зоне взаимодействия режущего инструмента и заготовки в данном режиме (рис. 3.28, в) характеризуется большим поперечным размером дорожек износа дна пропила, по сравнению с режимом 3 (рис. 3.28, г). В то же время присутствие таких расколовшихся частиц в составе алмазного порошка желательно, поскольку они положительно влияют на эффективность процесса распиливания. Во-первых, они служат как бы сепараторами, разделяющими крупные зерна, и способствуют более равномерному их распределению по дну пропила, а во-вторых, – играют роль скребка, своевременно выносящего переизмельченные частицы шлама из зоны обработки.

С целью количественной оценки степени влияния виброударного режима на интенсивность (производительность) распиливания образцов из синтетического корунда используем коэффициент эффективности

$$\eta_n = \left(1 - \frac{I_{ст}}{I_{вр}} \right) \cdot 100\%, \quad (3.24)$$

где $I_{ст}$ и $I_{вр}$ – соответственно, интенсивность обработки образца в

обычном и виброударном режимах распиливания.

Значения коэффициента эффективности при разной статической нагрузке для принятых виброударных режимов распиливания приведены в табл. 3.3. Приведенные значения свидетельствуют о том, что реализация виброударного режима распиливания в процессе обработки позволяет существенно повысить производительность выполнения операции. При этом степень влияния колебаний возрастает по мере уменьшения статической нагрузки.

Таблица 3.3 – Значения коэффициента эффективности при различных виброударных режимах распиливания и статической нагрузке на заготовку

Значение статической нагрузки, Н	Значение коэффициента эффективности, %		
	Варианты виброударного режима распиливания		
	1	2	3
4,00	37,1	73,5	70,3
3,06	72,1	83,4	73,7
2,11	77,9	84,0	78,8

Так, при значении $P_{ст} = 2,11$ Н величина η_h для всех виброударных режимов распиливания достигает 70–84 %. В случае использования максимального значения $P_{ст} = 4,00$ Н наиболее эффективным, с точки зрения повышения производительности распиливания, является режим 2, который характеризуется следующими параметрами: частота вынужденных колебаний распиловочной стрелы – 85,2 Гц; амплитуда вынужденных колебаний распиловочной стрелы – 32,4 мкм; амплитуда колебательной скорости – 1,04 м/мин; амплитуда колебательного ускорения – 9,28 м/с².

3.6.2. Влияние виброударного режима распиливания на шероховатость обработанной поверхности

Одним из условий минимизации безвозвратных потерь и увеличения стоимости готового изделия является обеспечение высокого качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов [14, 59]. Поэтому, одной из важнейших задач являлась сравни-

тельная оценка шероховатости, как одного из параметров, характеризующих качество поверхности образцов, распиленных при различных режимах обработки [122].

Для определения степени влияния вынужденных вибрационных колебаний на шероховатость распиливаемых заготовок рассмотрим механизм формирования микрогеометрии пропиленной поверхности, который можно представить следующим образом [123]. За счет механического взаимодействия торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска с заготовкой в контактных зонах, прилегающих к его кромкам, происходит скалывание частиц обрабатываемого материала. В результате на пропиленной поверхности возникают микронеровности, формирующие первоначальную шероховатость.

По мере заглубления диска участки пропиленной заготовки вступают в контакт с его боковыми поверхностями и подвергаются изнашиванию в результате трения скольжения взаимодействующих поверхностей, что сопровождается изменением первоначальной шероховатости поверхности пропиленных участков заготовки на протяжении всего времени выполнения операции. При этом характер изменения шероховатости, т.е. ее увеличение или уменьшение будет определяться:

- доминирующим видом изнашивания трущихся поверхностей;
- условиями трения (давление на площадках контакта и скорость скольжения);
- продолжительностью взаимодействия распиловочного диска и обрабатываемой заготовки, что равносильно пути относительного скольжения поверхностей.

Очевидно, что при прочих равных условиях путь относительного скольжения участков контактирующих поверхностей по глубине пропила не остается постоянным. Так участки пропиленной поверхности заготовки, находящиеся на входе распиловочного диска подвержены максимальному по длительности трению-изнашиванию, а участки, расположенные на выходе распиловочного диска – минимальному. Если принять, что доминирующим видом износа в процессе трения распиливаемой заготовки о боковую поверхность диска является окислительный [36], то можно утверждать, что по мере увеличения продолжительности их относительного скольжения шероховатость поверхности будет уменьшаться за счет проявления полирующего эффекта, свойственного этому виду

изнашивания. Участки поверхности, находящиеся в начале распила, в силу максимальной продолжительности их изнашивания, имеют минимальное значение высоты микронеровностей, которое, по мере увеличения глубины пропила, возрастает, достигая максимальной величины на участках поверхности, соответствующих стадии разделения заготовки.

Теперь проанализируем влияние виброударного режима взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой на условия формирования шероховатости ее распиленной поверхности. Отметим ряд особенностей протекания процесса в условиях вибрационного воздействия, влияющих на условия формирования микронеровностей обработанных полуфабрикатов.

1. Взаимодействие торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска с материалом заготовки протекает в виброударном режиме, что обуславливает скалывание частиц меньших размеров (рис. 2.30), чем при обработке традиционным способом. В результате величина микронеровностей поверхности пропиленной заготовки на участках зоны обработки, прилегающих к кромкам диска (первоначальная шероховатость), будет меньше, в сравнении с распиливанием в обычных условиях.

2. Процесс трения скольжения пропиленной поверхности заготовки с боковыми поверхностями диска протекает при наличии колебательных микросмещений, действующих параллельно поверхности их контакта и перпендикулярно вектору скорости резания. Как известно [117], это приводит к интенсификации процесса изнашивания за счет приращения пути относительного скольжения поверхностей проходимого в единицу времени по сравнению с обычной обработкой.

В качестве параметра, характеризующего степень этого приращения, можно использовать значение, так называемого, скоростного коэффициента

$$k_v = V_{0к} / V_0 = 2\pi fA / \omega R, \quad (3.25)$$

где $V_{0к}$ – амплитудное значение колебательной скорости;

V_0 – значение скорости резания;

f – частота колебаний;

A – амплитуда колебательных смещений;
 ω – угловая скорость вращения распиловочного диска;
 R – его радиус.

При этом, чем выше значение k_v , тем больше степень приращения пути трения и тем, соответственно, выше степень интенсифицирующего воздействия колебаний на процесс изнашивания контактирующих поверхностей. Здесь необходимо отметить, что скорость относительного скольжения боковой поверхности диска с пропиленной поверхностью заготовки по глубине пропила не остается постоянной. При фиксированной частоте вращения диска ее максимальное значение достигается на участках, расположенных в непосредственной близости к его торцевой поверхности, т.е. в зоне распиливания, а на участках, примыкающих к началу пропила значение скорости оказывается минимальным. При этом, по мере увеличения глубины пропила, разность между ними возрастает. Введение в зону резания вибрационных колебаний с амплитудой порядка 20-70 мкм позволяет в некоторой степени снизить неравномерность шероховатости обработанной поверхности вследствие относительного перемещения режущего инструмента и обрабатываемой заготовки. Однако, при постоянной амплитуде колебаний A_0 , а, соответственно, и амплитуде колебательной скорости, значение скоростного коэффициента k_v на периферии диска всегда будет меньше его значения на участках, соответствующих началу распиливания. В результате наибольшее интенсифицирующее воздействие на процесс изнашивания, а, соответственно, и на полирующий эффект вибрационные колебания будут оказывать на участки пропиленной заготовки, расположенные в начале распила, а по мере его увеличения оно будет снижаться. Необходимо отметить что при распиливании с шаржированием боковой и торцевой поверхности алмазным порошком при обработке сверхтвердых кристаллов, в частности, корунда и кристаллов алмаза, при использовании вибрации, подаваемой на обрабатываемую заготовку, наблюдается эффект срыва абразива с поверхности режущего инструмента. В результате алмазные зерна попадают в промежуток между распиловочным диском и обрабатываемой поверхностью при наличии между ними колебательных микросмещений. При этом сорванному абразиву сообщаются вынужденные движения с определенной амплитудой колебательной скорости и колебательного ускорения. Характер движения

алмазных зерен, а также их количество, зависят от соотношения амплитуды и частоты вынужденных вибрационных колебаний. При этом наблюдается возрастание подвижности абразива, его постоянная переориентация и изменение положения в зоне контакта. Это вызывает дополнительную работу по разрушению контактирующего с боковой поверхностью инструмента слоя заготовки, в результате чего сглаживаются неровности, характерные для традиционной обработки, и уменьшается, таким образом, шероховатость обработанной поверхности.

Следовательно, по сравнению с традиционной обработкой, при виброударном режиме распиливания, за счет интенсификации процесса изнашивания контактирующих поверхностей при наличии микросмещений боковых поверхностей диска относительно заготовки и дополнительной работы разрушения абразива, в значительной степени усиливается проявление полирующего эффекта, что вызывает снижение шероховатости распиленной поверхности заготовки.

3. Вместе с тем, как было показано в предыдущем разделе (рис. 2.31), под действием виброударного режима взаимодействия распиловочного диска с обрабатываемой заготовкой существенно повышается интенсивность распиливания, и, соответственно, сокращается время выполнения операции. Это приводит к сокращению продолжительности процесса изнашивания пропиленной поверхности заготовки о боковые поверхности распиловочного диска, что снижает время проявления полирующего эффекта.

Итак, на условия формирования микрогеометрии распиленной поверхности заготовки при виброударном воздействии комплексно будут влиять все выше отмеченные факторы. Причем, если первых два вызывают снижение шероховатости, то третий обуславливает ее повышение. Следовательно, конечное состояние распиленной поверхности заготовки будет определяться степенью влияния или вкладом каждого из этих факторов на условия формирования ее микрорельефа. Между указанными факторами существует тесная взаимосвязь и взаимовлияние, что не позволяет однозначно оценивать вклад каждого из них на условия формирования шероховатости распиленной поверхности заготовки без учета влияния остальных. Так, к примеру, повышение интенсивности вибрационных колебаний, за счет увеличения их амплитуды, приводит к некоторому

возрастанию размера скалываемых с заготовки частиц (рис. 2.30), вызывая тем самым повышение первоначальной шероховатости обрабатываемой поверхности. Но одновременно с этим, за счет повышения амплитуды колебательных смещений боковых поверхностей распиловочного диска относительно пропиленной поверхности заготовки, существенно интенсифицируется процесс ее изнашивания, увеличивается подвижность зерен алмазных микропорошков и их работа разрушения. В результате значительно возрастает проявление полирующего эффекта, вызывая тем самым снижение шероховатости распиленной поверхности заготовки. Следовательно, окончательное состояние поверхности заготовки будет определяться степенью влияния амплитуды и частоты колебаний, с одной стороны, на формирование параметров первоначальной шероховатости, а с другой – на степень проявления полирующего эффекта, которому принадлежит ведущая роль в окончательном формировании шероховатости распиленной поверхности.

3.6.3. Влияние виброударного режима взаимодействия обрабатываемой заготовки с распиловочным диском на шероховатость распиленной поверхности сверхтвердых кристаллов

В предыдущем разделе было показано, что шероховатость поверхности при распиливании изменяется в зависимости от глубины пропила заготовки. Поэтому, для того чтобы оценить шероховатость обработанной поверхности в целом и для адекватного сравнения режимов распиливания, при определении параметров R_a и R_z , измерения производились в направлении перпендикулярном следам обработки на всю длину диагонали образца. Целью данной серии опытов была экспериментальная оценка качества обработанной поверхности в условиях воздействия вибрационных колебаний различных как по амплитуде, так и по частоте.

Для этого были сделаны профилограммы поверхностей образцов, распиленных при различных режимах. Результаты представлены на рис. 3.30. Учитывая приведенный на профилограммах характер шероховатости, можно определить режимы обработки, при использовании которых получено наименьшее значение шероховатости (наилучшее качество) распиленных поверхностей

образцов. Такими режимами (см. рис. 3.30, в, г) являются виброударные режимы распиливания 2 и 3. Данное обстоятельство, по видимому, связано с оптимальным сочетанием таких параметров как амплитуда колебательной скорости (в данном случае она не столь значительна как в режиме 1, соответствующем резонансу распиловочной секции) и амплитуда колебательного ускорения, во многом определяемая частотой вынужденных колебаний.)

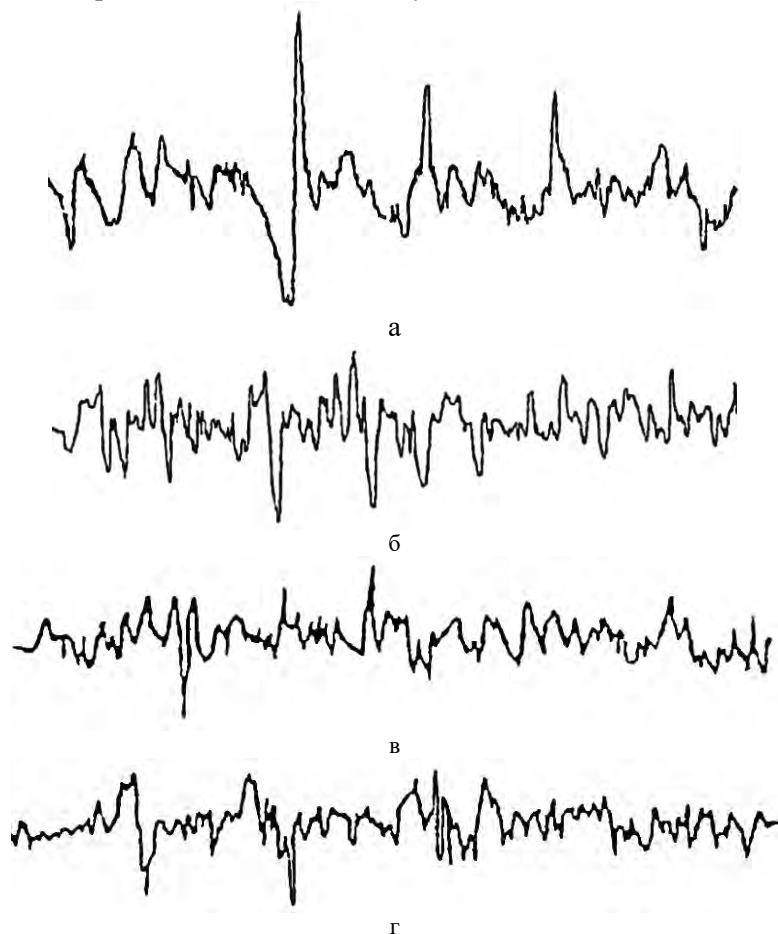


Рис. 3.30. Профилограмма поверхностей распиленных образцов при различных режимах обработки: а – традиционное распиливание; б – виброударный режим 1; в – виброударный режим 2; г – виброударный режим 3 ($VY=5 \cdot 10^4$; $GY=200$)

Для более полного выяснения степени влияния вынужденных колебаний на шероховатость распиленной поверхности были определены значения параметров Ra и Rz обработанных частей образцов (рис. 3.31) [124].

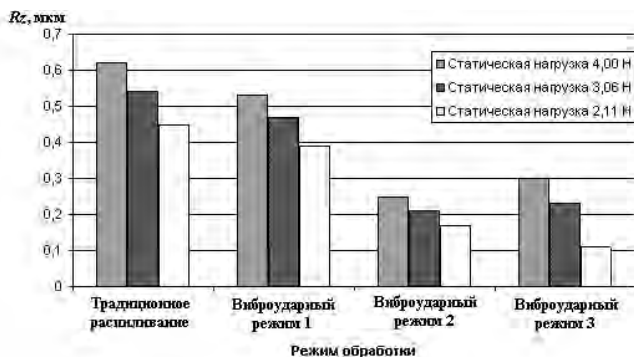


Рис. 3.31. Зависимость параметра Rz (мкм) распиленных поверхностей заготовок из синтетического корунда от режима обработки при различных значениях статической нагрузки

Анализ приведенных данных показывает, что по сравнению с обработкой в обычных условиях реализация виброударного режима распиливания приводит к снижению параметра Rz поверхности площадок распиленных образцов. Это происходит благодаря снижению первоначальной шероховатости распиленной поверхности вследствие скалывания частиц меньшего размера (см. рис. 3.25), а также интенсификации полирующего эффекта трения-изнашивания распиленных частей заготовки о боковые поверхности распиловочного диска при наличии между ними колебательных микросмещений, действующих в направлении параллельном поверхности их контакта. При этом наибольшее влияние на это снижение оказывает обработка на режиме 2, меньшее – на режиме 3 и еще меньшее – на режиме 1. Это вызвано тем, что с увеличением частоты подаваемых на заготовку колебаний уменьшается время динамического воздействия единичного алмазного зерна на обрабатываемый материал заготовки в момент ее контакта с торцевой поверхностью диска, что, в конечном итоге, приводит к снижению первоначальной шероховатости.

Однако, как указывалось выше, ее последующее уменьшение за счет изнашивания о боковые поверхности диска существенным образом зависит от отношения амплитуды колебательной скорости и скорости скольжения. Это заметно при сравнении результатов полученных при распиливании на режимах 2 и 3, которые имеют близкое значение параметров R_z и R_a , однако их меньшие значения при виброударном режиме 2 объясняются большей амплитудой колебаний. В случае совпадения частоты вынуждающих колебаний с собственной частотой распиловочной секции происходит увеличение амплитуды колебательной скорости, и в момент контакта торцевой поверхности диска с обрабатываемой заготовкой возникают значительные динамические нагрузки, вызывающие интенсивное разрушение поверхности (см. рис. 3.28, б). Это приводит к возрастанию на ней высоты микронеровностей, характеризующих первоначальную шероховатость. Поэтому последующее их сглаживание в процессе трения о боковые поверхности диска, несмотря на возрастание скоростного коэффициента k_v , происходит менее интенсивно, чем при распиливании на режимах 2 и 3.

С повышением статической нагрузки значение параметра R_z как в обычных условиях распиливания, так и при воздействии колебаний возрастает. Это объясняется ростом давления в зоне контакта торцевой поверхности диска с заготовкой, что вызывает увеличение размера частиц скалываемого материала, обуславливая, тем самым, повышение первоначальной шероховатости пропиленной поверхности образца. Кроме измерения параметра R_z были получены данные изменения параметра R_a в зависимости от технологических и вибрационных параметров обработки (табл. 3.4).

Влияние амплитуды колебательной скорости и амплитуды колебательного ускорения на значение параметра R_z отражают зависимости, приведенные на рис. 3.32, а, б. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что по мере увеличения $V_{ок}$ и $a_{ок}$ значение параметра R_z уменьшается, достигая минимального значения при $V_{ок}$ порядка 0,95–1,0 м/мин и $a_{ок}$ – 9,28–9,3 м/с², а при дальнейшем увеличении $V_{ок}$ и $a_{ок}$ – оно возрастает. Это свидетельствует о наличии оптимальных значений $V_{ок}$ и $a_{ок}$, обеспечивающих формирование минимального значения параметра R_z распиленных поверхностей. В этом случае, очевидно, происходит формирование минимальной

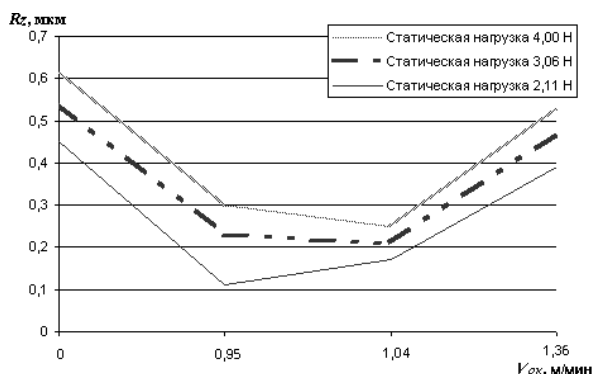
первоначальной шероховатости, а также реализуются наилучшие условия проявления полирующего эффекта за время распиливания.

Таблица 3.4 – Значения параметра шероховатости Ra (мкм) распиленных поверхностей заготовок из синтетического корунда при различных значениях статической нагрузки и режимах обработки

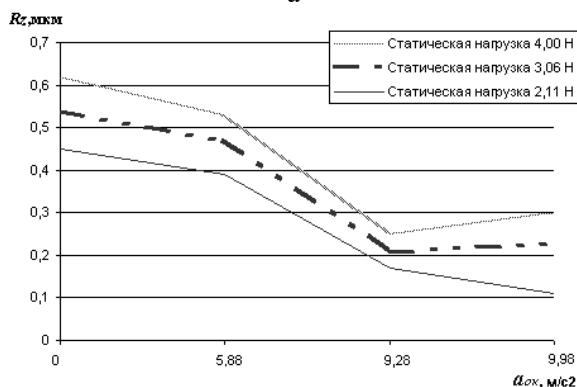
Режим обработки		Без вибрации	1	2	3
		Значение параметра Ra, мкм			
Статическая нагрузка, Н	4	0,098	0,045	0,049	0,064
	3,06	0,078	0,028	0,03	0,041
	2,11	0,06	0,01	0,02	0,03

Кроме того, на рис. 3.32, б отражено значительное изменение параметра шероховатости Rz в зависимости от значения статической нагрузки при наибольшем значении амплитуды колебательного ускорения (обработка в виброударном режиме 3). Как указывалось ранее, при больших значениях амплитуды колебательного ускорения происходит интенсивный процесс дробления зерен алмазных микропорошков и их внедрение в более мягкую поверхность распиловочного диска. Поэтому доля более мелких зерен в составе свободного абразива при обработке в виброударном режиме 3 больше, чем для режимов 1 и 2. Тогда снижение значения статической нагрузки с 4,00 Н до 2,11 Н приводит к более интенсивному, по сравнению с остальными режимами распиливания, снижению внедрения алмазных зерен меньшего размера в материал заготовки в зоне пропила и уменьшению размера скальываемых частиц, что снижает первоначальную шероховатость заготовки. Кроме того, на столь резкое снижение шероховатости влияет, увеличенная в режиме 3, частота вынужденных колебаний, которая вызывает дополни-

тельное полирование пропиленной поверхности заготовки о боковые стороны распиловочного диска.



а



б

Рис. 3.32. Зависимость параметра Rz (мкм) распиленных поверхностей заготовок из синтетического корунда при различных значениях статической нагрузки: а – от амплитуды колебательной скорости; б – от амплитуды колебательного ускорения

Для оценки степени влияния виброударного режима распиливания на формирование топографии обработанной поверхности были проведены эксперименты на образцах из синтетического корунда. Так как их распиливание осуществлялось с периодическим нанесением на торцевую поверхность диска зерен алмазных микропорош-

ков, т.е. с подшаржированием инструмента, то присутствие в зоне обработки свободных алмазных частиц позволило более четко проследить влияние колебаний на формирование следов изнашивания на распиленных поверхностях образцов.

На рис. 3.33 приведены фотографии участков распиленных поверхностей образцов из синтетического корунда, полученных как в обычных условиях обработки, так и с использованием трех принятых виброударных режимов распиливания. При традиционном распиливании (рис. 3.33, а) на обработанной поверхности образца формируются однонаправленные риски, представляющие собой следы ее абразивного изнашивания зернами алмазных микропорошков, закрепленных (шаржированных) на боковой поверхности инструмента. Это объясняется тем, что при такой кинематике и динамике взаимодействия боковых поверхностей диска с пропиленными участками заготовки, алмазные зерна, попадающие в зазор между контактирующими поверхностями, имеют ограниченную подвижность и поэтому внедряются в поверхность бронзового диска, твердость которого значительно ниже твердости корунда. При виброударном режиме 1 распиливания на поверхности (рис. 3.33, б) образуется совокупность пересекающихся следов обработки, часть из которых совпадает с направлением вектора скорости резания, а другие направлены перпендикулярно ему.

Формирование такой топографии поверхности связано с наличием дополнительных колебательных смещений заготовки с большим значением амплитуды, что характерно именно для резонансного режима работы вибратора. В результате, шаржированные в боковую поверхность диска зерна алмазных микропорошков осуществляют абразивное разрушение поверхности заготовки, нанося на нее пересекающуюся сетку следов. Кроме того, за счет действия знакопеременных динамических нагрузок существенно повышается подвижность алмазных частиц в зоне обработки. Это проявляется в постоянной их переориентации и изменении положения в зоне контакта, что, в свою очередь, приводит к неповторяемости следов обработки на распиленной поверхности. Одновременно с этим под действием колебаний значительно интенсифицируется степень механического воздействия на обрабатываемую поверхность свободных алмазных частиц, находящихся в зоне скользящего контакта. Они вызывают

скалывание мельчайших частиц корунда, как бы зачищая пропиленную поверхность, вызывая снижение ее шероховатости.

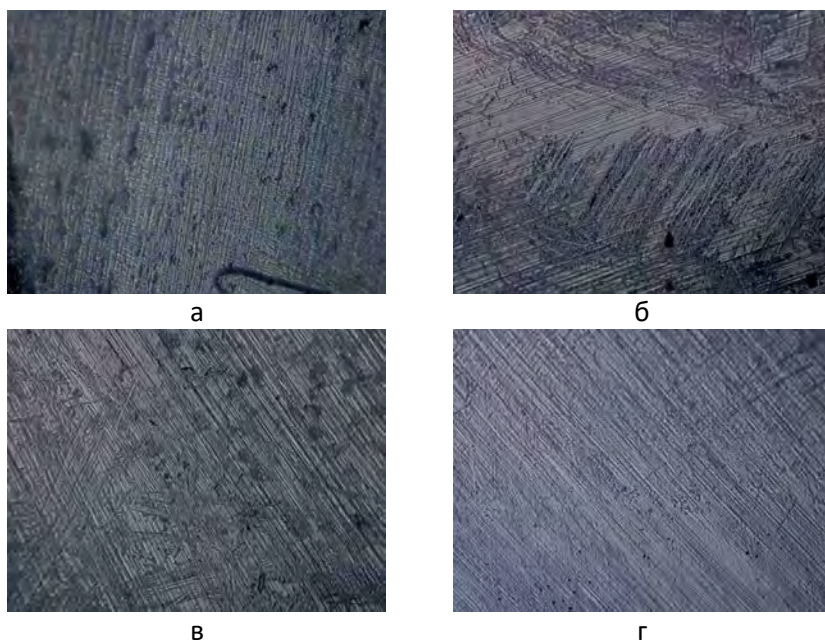


Рис. 3.33. Распиленная поверхность образцов из корунда (x200):
а – традиционное распиливание; б – виброударный режим 1; в – виброударный режим 2; г – виброударный режим 3

При распиливании в виброударном режиме 2 на поверхности заготовки (рис. 3.33, в) отсутствуют четко выраженные пересекающиеся следы обработки. В этом случае на ней преимущественно формируются однонаправленные следы, совпадающие с вектором скорости скольжения, которые пересекаются перпендикулярно направленными малочисленными и хаотически расположенными рисками.

В отличие от предыдущего, рассматриваемый виброударный режим распиливания характеризуется более высокой частотой колебаний заготовки при меньшем значении амплитуды ее колебательных смещений. Причем амплитуда колебательной скорости оказы-

вается меньше ее значения, соответствующего виброударному режиму 1 распиливания. Поэтому величина скоростного коэффициента k_v , характеризующего степень влияния колебаний на увеличение пути трения, а, соответственно, на снижение первоначальной шероховатости пропиленной поверхности также оказывается меньше, чем в предыдущем случае. Вместе с тем, виброударный режим 2 характеризуется более высоким уровнем динамических нагрузок, действующих в зоне скользящего контакта, что обусловлено большим значением амплитуды колебательного ускорения. Это, в свою очередь, приводит к более интенсивному разрушению зерен алмазных микропорошков, что сопровождается уменьшением размера частиц скальываемого ими материала заготовки (рис. 3.25, в) и соответствующим снижением шероховатости ее распиленной поверхности. Наличие на ней хаотически расположенных коротких рисок очевидно связано с воздействием на нее свободных алмазных частиц, которые под действием центробежных сил выносятся из зоны скользящего контакта.

На рис. 3.33, г приведена фотография поверхности заготовки из корунда, распиленной на виброударном режиме 3. Как видно, ее топография весьма схожа с распиленной поверхностью, полученной на виброударном режиме 2, с той разницей, что однонаправленные следы обработки оказываются более выраженными, а количество поперечных рисок значительно меньше. По сравнению с выше рассмотренными, данный виброударный режим распиливания имеет наибольшее значение частоты колебаний при наименьшей амплитуде колебательных смещений. Такое соотношение этих параметров определяет наименьшую величину колебательной скорости, но наибольшее значение амплитуды колебательного ускорения. При таких условиях процесс разрушения зерен алмазных микропорошков в зоне скользящего контакта протекает более интенсивно. Это, как указывалось выше, приводит к уменьшению размера частиц, удаляемых с поверхности заготовки измельченными алмазными зёрнами, обуславливая тем самым снижение ее шероховатости. При этом наличие небольших значений амплитуды колебательных смещений заготовки не позволяет алмазным частицам совершать относительные перемещения в направлении перпендикулярном вектору скорости скольжения, что является причиной формирования на распиленной поверхности однонаправленных следов обработки.

3.6.4. Оценка влияния сил заклинивания распиловочного диска на качество обработанной поверхности

В отличие от металлорежущего инструмента типа дисковых фрез, ножовочных полотен и пил, распиловочный диск не имеет на торцевой поверхности регулярно расположенных режущих зубьев с соответствующим их разводом. Расположенные на его торцевой и боковой поверхности зерна шаржированного алмазного микропорошка имеют небольшие размеры и не могут предотвратить стремление пропиленных частей заготовки сомкнуться за счет действия внутренних напряжений. В результате возрастает величина усилий, действующих по нормали к боковым поверхностям диска, что обуславливает их постоянный скользящий контакт с пропиленными участками заготовки.

Поэтому анализ влияния виброударного режима распиливания на качество поверхности обработанных заготовок был бы неполным без учета действия сил заклинивания режущего инструмента в обрабатываемой заготовке. Следует отметить, что, как было установлено ранее (рис. 3.22), с увеличением глубины пропила заготовки происходит плавное возрастание момента сил трения, что вызвано воздействием сил внутренних напряжений заготовки, стремящихся сжать распиленные участки образца к боковым сторонам инструмента. Причем, как при традиционной обработке, так и при реализации виброударного режима распиливания, максимальное значение сил заклинивания происходит при глубине распиливания, составляющей порядка 55–65 % от длины диагонали заготовки. Данное увеличение вызывает рост температуры в зоне скользящего контакта инструмента и заготовки, в результате увеличения сил давления на боковые стороны распиловочного диска. Это приводит к изменению условий и механизма трения-скольжения в зоне распиливания. Как видно из рис. 3.33, а, при взаимодействии боковых сторон распиловочного диска и пропиленных участков образца имеет место абразивное изнашивание-полирование обработанных частей заготовки (сетка однонаправленных рисок, оставленных зернами алмазных микропорошков, закрепленных на боковой поверхности инструмента). Увеличение температуры в зоне взаимодействия может приводить к изменению механизма изнашивания с абразивного на адгезионный [31 ,34, 125 ,126]. Это вызывает

увеличение срыва с боковых поверхностей распиловочного диска шаржированного алмазного порошка и пакетированию им обработанной поверхности заготовки в зоне пропила, соответствующей максимальному значению сил заклинивания. Это предположение подтверждает фотография поверхности распила сделанная при традиционном распиливании заготовки (рис. 3.34). При окончании распиливания действие внутренних напряжений прекращается и следует резкое снижение сил заклинивания до значения соответствующего силам трения боковых сторон распиловочного диска о распиленные поверхности заготовки из корунда.

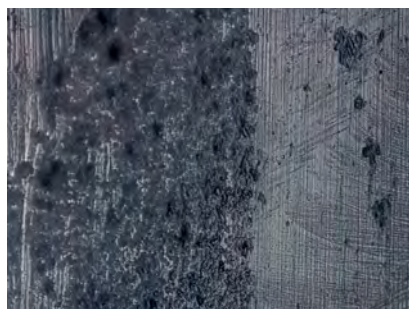


Рис. 3.34. Фотография (x200) конечной зоны (60 % от длины диагонали) обработанной поверхности заготовки при традиционном распиливании

На фотографии ярко видны следы, оставленные алмазным порошком на поверхности корунда в результате возросшего давления пропиленных частей заготовки на боковые поверхности распиловочного диска. Важно подчеркнуть, что при виброударном режиме распиливания значение сил заклинивания будет меньше, чем при обычной обработке, хотя характер их изменения остается аналогичным. Поэтому и описанный эффект срыва с боковых поверхностей алмазного порошка будет проявляться в меньшей степени. Для подтверждения данного предположения и сравнения степени проявления следов алмазного порошка на пропиленном корунде был проведен сравнительный анализ степени внедрения алмазного порошка в поверхность заготовки по глубине распила для различных режимов обработки (рис. 3.35). В результате были получены диаграммы, отражающие концентрацию на распиленной поверхности образца уг-

лерода, содержащегося в алмазном абразивном порошке. Данные были получены с помощью микроанализатора мод. AN-10000 фирмы Link Analytical (Англия) в трех различных по глубине пропила точках расположенных на диагонали заготовок. Согласно представленным диаграммам, в начале распиливания (рис. 3.35, а) наибольшее содержание углерода наблюдается при использовании виброударного режима 3, который характеризуется наибольшей частотой вынужденных колебаний. Это вызывает увеличение количества ударных взаимодействий торца распиловочного диска с дном пропила заготовки, что приводит к увеличению количества алмазных зерен сорвавшихся с боковых поверхностей режущего инструмента при его ударе о материал заготовки и их контакту с распиливаемой поверхностью синтетического корунда. Содержание же углерода при традиционной обработке и при других виброударных режимах распиливания находится приблизительно на одном уровне. На участке, соответствующем середине распиливания, наибольшее содержание углерода наблюдается при использовании виброударных режимов 2 и 3. Это также можно объяснить срывом абразива с боковых поверхностей распиловочного диска и внедрением частиц в поверхность заготовки при ударных взаимодействиях режущего инструмента с дном пропила образца. С уменьшением частоты вынужденных колебаний содержание углерода на поверхности корунда резко снижается и становится меньше, чем при традиционной обработке.

Это связано с тем, что при обычном методе обработки происходит более значительное увеличение сил заклинивания режущего инструмента за счет внутренних напряжений в образце по мере увеличения глубины пропила. Данное изменение в характере распределения углерода на поверхности заготовки становится более ярко выраженным при приближении к зоне максимального демпфирования колебаний (рис. 3.35, в), где имеет место резкое возрастание количества сорванных зерен абразива при традиционном распиливании. Данное обстоятельство можно объяснить возрастанием температуры в зоне обработки и изменением с абразивного на адгезионный характера трения.

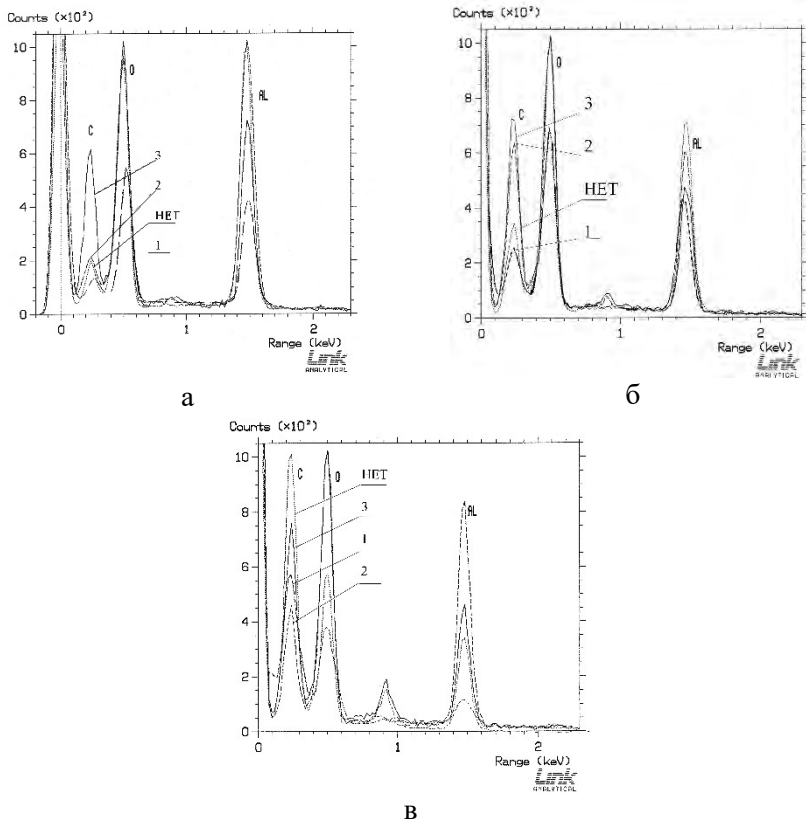


Рис. 3.35. Диаграммы спектрального состава поверхности распиленного корунда при различных режимах обработки: а – участок в начале распиливания; б – участок в середине распиливания; в – участок соответствующий максимальному значению сил заклинивания; HET – традиционное распиливание; 1 – виброударный режим 1; 2 – виброударный режим 2; 3 – виброударный режим 3

3.6.5. Влияние виброударного режима распиливания на характер износа режущего инструмента

В процессе распиливания заготовок из сверхтвёрдых кристаллов происходит значительный износ тонкого распиловочного диска, толщина которого в большинстве случаев равна 0,05 или 0,06 мм. Боковые, а в процессе распиливания и торцевая, поверхности ре-

жущего инструмента шаржируются зернами алмазного микропорошка. В процессе обработки периодически возникает необходимость в подрезке распиловочного диска, для того чтобы удалить поверхности режущего инструмента, лишившиеся алмазного порошка и замедляющие процесс обработки. При этом снятие части материала приводит к уменьшению диаметра бронзового диска, а соответственно и к уменьшению скорости распиливания, а также к снижению периода стойкости инструмента. Для выяснения характера износа режущего инструмента и влияния виброударного режима распиливания после обработки каждой заготовки распиловочный диск снимался, и фиксировались технологические параметры обработки. После этого с помощью оптического микроскопа фирмы «Leica» (Англия) выполнялись фотографии, и проводилось исследование поверхности диска примыкающей к торцевой (режущей) части. Полученные фотографии представлены на рис. 3.36. Они позволяют судить о характере износа шаржированной алмазным порошком рабочей поверхности режущего инструмента, которая выполняет основную работу по распиливанию сверхтвердых кристаллов. При традиционном распиливании на поверхности распиловочного диска отчетливо видна зона повышенного износа, которая представляет собой блестящий, без следов алмазных частиц периферийный участок диска, идущий по всей окружности и непосредственно примыкающий к его торцевой (режущей) поверхности (рис. 3.36, а). Это вызвано заклиниванием режущего инструмента при обработке заготовки. Участки вблизи торцевой поверхности распиловочного диска имеют наибольшую скорость. В результате шаржированные в данный участок распиловочного диска алмазные зерна испытывают наибольшие ударные нагрузки при взаимодействии с материалом заготовки, срываются с боковой поверхности и выносятся из зоны обработки. Кроме того, к увеличению нагрузок приводят повышенные силы заклинивания режущего инструмента по мере его углубления в материал заготовки, что вызывает сжатие, неравномерный износ и формирование конусности боковых поверхностей диска распиленными частями корунда. Поэтому для данной зоны характерно отсутствие алмазного микропорошка и, соответственно, пониженная режущая способность распиловочного диска, что приводит к необходимости его подрезки.



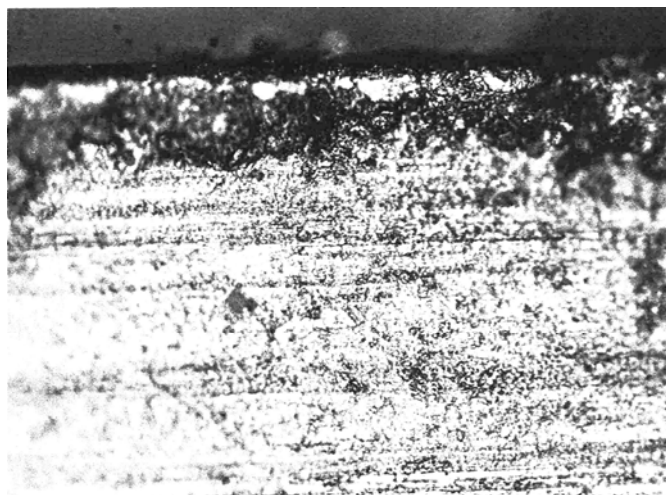
a



b



В



Г

Рис. 3.36. Поверхность распиловочного диска вблизи от его торцевой (режущей) поверхности при различных режимах обработки (x200): а – традиционное распиливание; б – виброударный режим 1; в – виброударный режим 2; г – виброударный режим 3

При сообщении вибрационных колебаний распиловочной стреле, а вместе с ней и обрабатываемой заготовке с частотой близкой собственной частоте колебаний станка (виброударный режим 1), ярко выраженной зоны повышенного износа рабочей части распиловочного диска в процессе обработки не наблюдается (рис. 3.36, б). Более того, заметны следы взаимодействия, которые оставлены в результате перемещения по боковой поверхности режущего инструмента алмазных зерен микропорошка. Это вызвано их повышенной подвижностью вследствие значительной амплитуды колебательной скорости в данном режиме обработки. Для данного режима характерен меньший износ боковой поверхности распиловочного диска вблизи его торцевой поверхности, что объясняется следующим.

Во-первых, при реализации виброударного режима взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой происходит их перемещение относительно друг друга со значительной амплитудой. В результате чего происходит срыв шаржированных алмазных зерен с боковой поверхности режущего инструмента и их хаотическое перемещение как относительно уже распиленной поверхности заготовки (рис. 3.33, б), так и относительно шаржированной поверхности диска. Это приводит к попаданию абразива в зону обработки, увеличивая взаимодействие его с периферийной частью режущего инструмента и тем самым производительность операции. В результате не происходит образования ярко выраженной зоны вблизи режущей кромки инструмента, лишенной шаржированного абразива.

Во-вторых, согласно данным по применению виброударного режима распиливания (рис. 3.26) в результате сообщения вибрационных колебаний распиловочной стреле повышается производительность обработки, что снижает время взаимодействия боковой поверхности режущего инструмента с распиливаемой заготовкой, уменьшая вероятность образования зоны с пониженной режущей способностью вблизи торцевой поверхности диска.

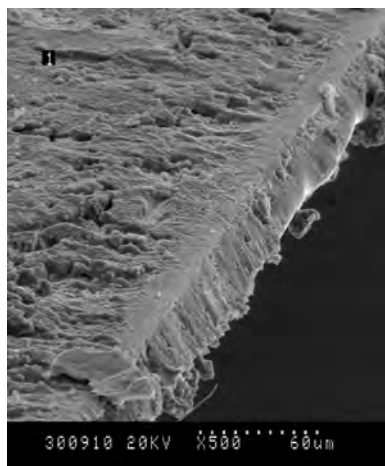
При использовании для обработки виброударных режимов 2 и 3 (рис. 3.36, в, г) также наблюдается картина более равномерного, по сравнению с распиливанием в обычном режиме, износа боковой поверхности режущего инструмента, что вызвано, по-видимому, снижением времени обработки в данных режимах. Однако, по сравнению с распиливанием в виброударном режиме 1, на боковых по-

верхностях инструмента заметно большее количество блестящих, лишенных абразива зон. Это вызвано более значительным срывом шаржированного алмазного микропорошка с поверхности диска при его ударном взаимодействии с поверхностью пропила, что подтверждается данными по распределению углерода (алмазных зерен) на обработанной поверхности синтетического корунда (рис. 3.35).

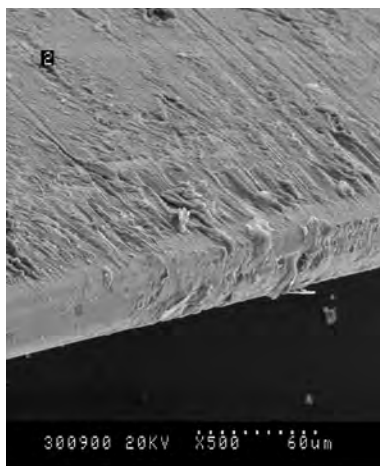
Для более полного выяснения характера влияния виброударного режима распиливания на состояние боковой и торцевой поверхности распиловочного диска были сделаны фотографии указанных поверхностей с помощью электронного растрового микроскопа модели «Cam Scan». Полученные фотографии представлены на рис. 3.37.

Из представленных фотографий видно, что при распиливании с вибрационными колебаниями, сообщаемыми заготовке относительно распиловочного диска, поверхность последнего получается более гладкой, чем при традиционном распиливании. Это происходит вследствие взаимного перемещения инструмента и гораздо более твердого обрабатываемого корунда относительно друг друга. Кроме того, при обработке в виброударном режиме 1, для которого характерна наибольшая амплитуда колебательной скорости, а, соответственно и наибольшая подвижность зерен алмазного абразива, на боковой поверхности режущего инструмента заметны вертикальные полосы. Это можно объяснить тем, что в данном режиме обработки алмазные зерна выполняют как бы роль миниатюрных шариков, т. е. трение скольжения между распиловочным диском и распиленной поверхностью корунда частично заменяется трением качения. Это позволяет уменьшить заклинивание режущего инструмента (рис. 3.22) и помогает объяснить низкое содержание на поверхности заготовки зерен алмазного микропорошка в режиме 1 (рис. 3.35), вследствие снижения температуры в зоне обработки. Таким образом, из приведенных выше данных следует ожидать увеличение износостойкости распиловочного диска, так как характерная для традиционной обработки лишенная абразива зона на поверхности диска при виброударном режиме распиливания отсутствует.

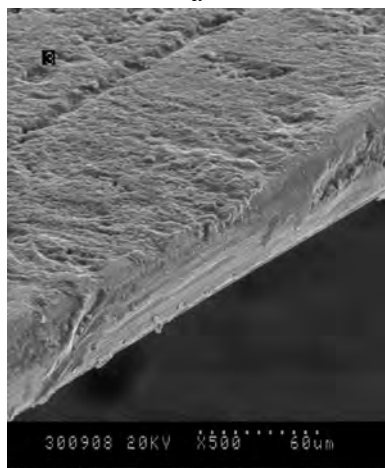
Для подтверждения этого предположения был проведен ряд сравнительных экспериментов по изучению стойкости режущего инструмента, как при традиционном распиливании, так и при использовании виброударного режима 2.



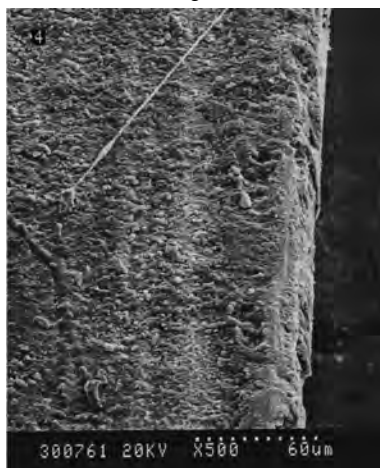
а



б



в



г

Рис. 3.37. Фотографии поверхности распиловочного диска при различных режимах обработки: а – традиционное распиливание; б – виброударный режим 1; в – виброударный режим 2; г – виброударный режим 3

Выбор данного режима распиливания обусловлен наилучшими показателями интенсивности обработки и качества получаемых поверхностей по сравнению с остальными виброударными режимами. Для оценки стойкости режущего инструмента использовалась сле-

дующая методика. Из одной партии выбирали две группы распиловочных дисков. Затем режущий инструмент из одной группы устанавливался в шпиндельном узле распиловочной секции. Устанавливалось значение статической нагрузки $P_{ст} = 4,0$ Н, и производилось распиливание образца из синтетического корунда. Фиксировалось время обработки, по которому определялась интенсивность распиливания. Затем устанавливали следующий образец, и процесс обработки повторялся с использованием того же режущего инструмента. Определялась интенсивность распиливания второго образца. Опыты проводились до тех пор, пока распиловочный диск не терял режущую способность, либо пока соблюдались его геометрические параметры (поверхность диска оставалась равной, а на режущей кромке не наблюдалось скола материала). Аналогичным образом проводилось распиливание с использованием виброударного режима 2 распиловочными дисками из второй группы. Опыты повторялись не менее трех раз.

Средние арифметические значения интенсивности распиливания представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Значения производительности образцов одним распиловочным диском для различных режимов обработки

Интенсивность распиливания, мм ² /мин				
№ образца	Режим обработки			
	Традиционное распиливание	Отношение интенсивности распиливания данного образца к интенсивности распиливания образца 1, %	Виброударный режим 2	Отношение интенсивности распиливания данного образца к интенсивности распиливания образца 1, %
1	0,85	100	3,11	100
2	0,52	61,2	2,38	76,5
3	—	—	1,74	55,9

Таким образом, из представленных данных видно, что при использовании традиционного режима обработки одним распиловочным диском можно распилить не более двух образцов, причем интенсивность распиливания второго образца снижается на 40 %. Использование виброударных режимов позволяет увеличить

количество распиленных образцов, причем снижение интенсивности обработки последующих образцов меньше, чем при обычной обработке. Следовательно, применение вынужденных колебаний в процессах распиливания сверхтвердых кристаллов позволяет повысить износостойкость инструмента на 20–25 %.

4. ТЕХНОЛОГИЯ РАСПИЛИВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗАГОТОВКИ

4.1. Методика проведения экспериментальных исследований

4.1.1. Разработка технологической схемы и создание конструкции распиловочной секции, обеспечивающей двухмерное циркуляционное движение заготовки

Традиционная схема распиливания кристаллов алмаза (рисунок 1.19) характеризуется тем, что при рабочем положении стрелы, т.е. в процессе распиливания, центр тяжести противовеса (точка А) всегда расположен выше оси ее качания (точка О). Это необходимо для придания стреле неуровновешенного состояния, благодаря которому обеспечивается гравитационная подача заготовки. Стрела в рабочем положении поддерживается с помощью регулировочного винта 6, опирающегося на упругую прокладку 10. Таким образом, стрелу оправданно рассматривать как колебательное звено, имеющее возможность совершать колебания относительно оси ее качания.

Как известно из теории колебаний [103], чтобы получить двухмерное периодическое циркуляционное движение, необходимо обеспечить сложение двух одномерных синусоидальных компланарных (т.е. совершающихся в одной плоскости) колебаний с равными или находящимися в рациональном отношении частотами. Применительно к нашему случаю (рис. 4.1) для придания заготовке в плоскости распиливания двухмерного колебательного движения необходимо, чтобы конец стрелы, на котором она закреплена, совершал одновременно колебательные смещения в вертикальном A_v и горизонтальном A_g направлениях [127, 128].

Первое направление может быть обеспечено за счет придания поворотных движений стреле 4 вокруг оси ее качания (точка O), а второе – путем сообщения оси качания стрелы вынужденных колебаний, направленных вдоль горизонтальной оси OX . При этом для получения двухмерного циркуляционного движения заготовки 3, т.е. для придания стреле одновременно как вертикальных, так и горизонтальных колебаний, необходимо использовать один и тот же источник их возбуждения (вибропривод), что обеспечивает одинаковую частоту вынужденных колебаний в обоих направлениях.

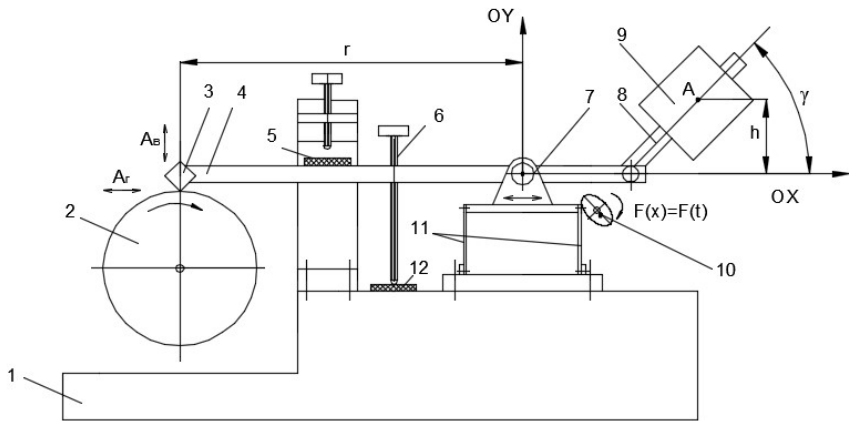


Рис. 4.1. Принципиальная схема распиловочной секции, обеспечивающая двухмерное циркуляционное движение заготовки:

- 1 – основание; 2 – распиловочный диск; 3 – заготовка; 4 – стрела; 5 – верхний упругий ограничитель; 6 – регулировочный винт; 7 – узел качания стрелы; 8 – поворотный рычаг; 9 – противовес; 10 – механический вибратор; 11 – плоские пружины; 12 – нижний упругий ограничитель

С учетом того что центр тяжести противовеса 9 (точка A), установленного на поворотном рычаге 8, расположен выше оси качания стрелы (точка O) на величину h , технически решить указанную задачу можно путем сообщения узлу качания стрелы 7 вынужденных колебаний, направленных вдоль горизонтальной оси. В этом случае одновременно с колебательными смещениями стрелы в горизонтальном направлении в результате возникающих виброускорений на противовес действуют инерционные силы, которые создают пе-

ременный вращающий момент $M_{вр}$, вызывающий перемещение заготовки по дуге окружности радиусом r . Так как величина этих смещений значительно меньше r , то оправдано принять, что заготовка совершает прямолинейное колебательное движение вдоль вертикальной оси. Для придания узлу качания стрелы вынужденных колебаний он устанавливается на плоских пружинах 11, образующих плоскопараллелограммный подвес (упругий подвес), допускающий его перемещение вдоль оси OX . В качестве источника этих колебаний применен механический (эксцентриковый) вибратор 10 с приводом от электродвигателя постоянного тока (на рис. 4.1 он не показан). Распиловочный (отрезной) диск 2 закреплен на валу электродвигателя (на рис. 4.1 он не показан), который жестко связан с основанием 1.

До проведения соответствующих испытаний были предусмотрены два варианта предложенной технологической схемы распиливания: в первом использовался только один нижний упругий ограничитель 12 [129–133], а во - втором дополнительно применялся верхний регулируемый упругий ограничитель 5 [134]. Сделано это для того, чтобы в ходе последующих испытаний сравнить эффективность функционирования колебательной системы при одно- и двухстороннем виброударном взаимодействии стрелы с ограничителями, по результатам которых можно было бы определить рациональный вариант технологической схемы распиливания.

Особо следует подчеркнуть, что предложенная технологическая схема распиливания принципиально отличается от традиционной только наличием колебательной системы, состоящей из упругого подвеса узла качания стрелы и электромеханического вибратора, а также узла верхнего ограничителя. В этой связи создание конструкции экспериментальной установки осуществлялось путем использования отдельных узлов промышленной распиловочной секции станка модели ШП-2. На рис. 4.2 представлена фотография общего вида экспериментальной распиловочной секции.

Она состоит из основания 1, на котором в призме 2 закреплен электродвигатель 3 с установленным на его валу распиловочным диском 4. Стрела 7 с регулировочным винтом 6 установлена в кронштейне 9 на опорах качения, обеспечивающих ее поворот относительно оси качания с минимальным трением.

На одном конце стрелы смонтирован узел крепления кристалла (образца) 5, а на другом – установлен узел противовеса 8. Кронштейн жестко связан с верхней (подвижной) частью плоскопараллелограммного подвеса 10, образованного двумя закаленными упругими стальными (У8А) пластинами (толщиной 0,1 мм, шириной 36 мм, свободной длиной 60 мм с расстоянием между ними 50 мм), а его нижняя (неподвижная) часть закреплена на основании секции.

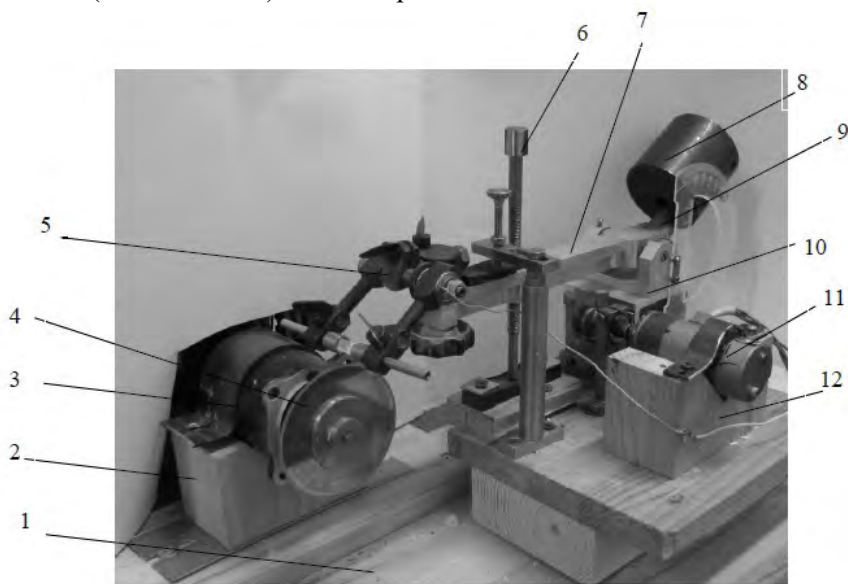


Рис. 4.2. Общий вид экспериментальной распиловочной секции:
 1 – основание; 2 – призма; 3 – электродвигатель; 4 – распиловочный диск; 5 – узел крепления кристалла (образца); 6 – регулировочный винт; 7 – стрела, 8 – узел противовеса; 9 – кронштейн; 10 – плоскопараллелограммный подвес;
 11 – электродвигатель постоянного тока; 12 – установочная призма

В установочной призме 12, прикрепленной к основанию секции, с помощью хомута закреплён электродвигатель постоянного тока 11, на валу которого установлен сменный (с различной величиной эксцентриситета) эксцентрик.

Предварительно призма установлена таким образом, чтобы при вращении эксцентрика его рабочая часть постоянно контактировала с упором, жестко связанным с подвижной частью упругого подвеса

узла качания стрелы, в результате чего последнему сообщаются колебательные смещения вдоль горизонтальной оси.

В этом случае регулировочный винт стрелы совершает относительно упругого ограничителя аналогичные колебательные движения, что потребовало изменения конструкции последнего (рисунк 4.3) и его упругих характеристик по сравнению с традиционно применяемыми упругими (резиновыми) прокладками.

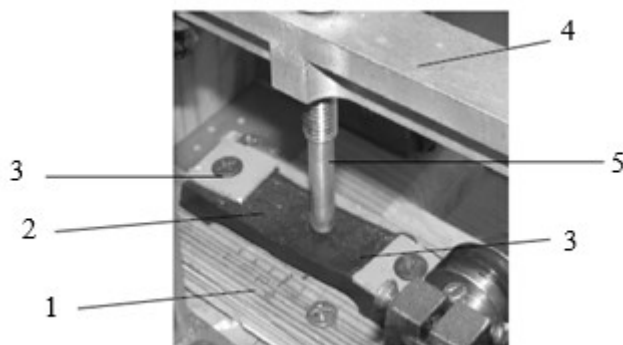


Рис. 4.3. Узел опорного винта стрелы, контактирующий с нижним упругим ограничителем:

1 – корпус; 2 – резиновая полоса; 3 – выступы; 4 – стрела; 5 – опорный винт

В предложенной конструкции нижний упругий ограничитель выполнен в виде резиновой полосы 2 толщиной 4,5 мм, шириной 27 мм, которая по краям закреплена между двумя выступами 3, предусмотренными на его корпусе 1, и имеет свободную длину 42 мм.

Корпус ограничителя устанавливается на основании секции в таком положении, чтобы опорный винт 5 стрелы 4 контактировал с резиновой полосой посередине ее свободной длины.

Конструктивное исполнение верхнего упругого ограничителя поясняется фотографией этого узла, представленной на рис. 4.4.

Он состоит из кронштейна 2, прикрепленного к основанию секции 1 поворотной планки 3, установленной на верхней части кронштейна, в которой расположен регулировочный винт 4 с контргайкой 5. При движении стрелы вверх он контактирует с резиновой

прокладкой 6, наклеенной на верхнюю поверхность стрелы 7. Путем изменения положения регулировочного винта устанавливается необходимая величина зазора между ним и резиновой прокладкой на стреле.

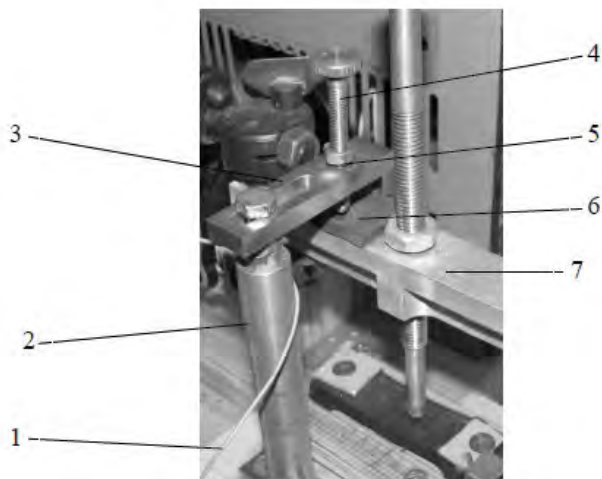


Рис. 4.4. Узел верхнего ограничителя:

- 1 – основание; 2 – кронштейн; 3 – поворотная планка; 4 – регулировочный винт;
5 – контрпайка; 6 – резиновая прокладка; 7 – стрела

За счет поворота планки регулировочный винт выводится из зоны его контакта со стрелой, что необходимо при реализации режима одностороннего виброударного взаимодействия стрелы с нижним ограничителем, а также при ее переводе в нерабочее положение.

В созданной установке применен узел крепления кристалла, используемый в промышленной распиловочной секции станка модели ШП-2 (рисунок 4.5).

Он состоит из поворотного кронштейна 1, на оси которого установлены два зажима 2 и 7, предназначенных для установки цилиндрических оправок 3 и 6, с помощью которых обеспечивается закрепление обрабатываемого кристалла (образца) 4. Причем в одну оправку он клеивается, а второй поджимается. Требуемая ориентация кристалла относительно распиловочного диска 5 обеспечивается

ся за счет поворота кронштейна 1 с оправками относительно верхней плоскости стрелы.

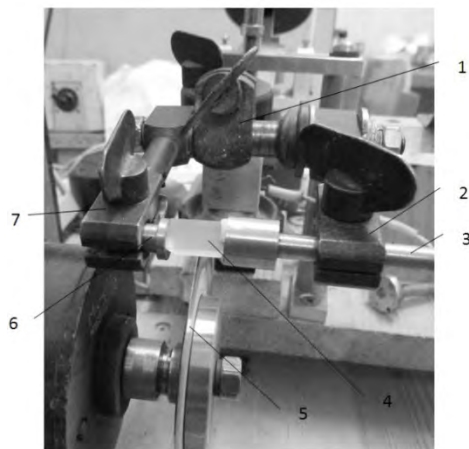


Рис. 4.5. Узел крепления кристалла (образца):
1 – кронштейн; 2, 7 – зажимы; 3, 6 – цилиндрическая оправка; 4 – обрабатываемый кристалл; 5 – распиловочный диск

Узел привода вращения распиловочного (отрезного) диска (рисунок 4.6) включает в себя установочную призму 2, прикрепленную к основанию секции 1, в которой с помощью хомута 3 закреплен электродвигатель постоянного тока 4 модели 2Д-60В.



Рис. 4.6. Узел привода вращения распиловочного (отрезного) диска:
1 – основание секции; 2 – установочная призма; 3 – хомут; 4 – электродвигатель постоянного тока; 5 – отрезной диск; 6 – фланец

На его валу жестко установлена оправка, имеющая цилиндрический выступ, по которому по скользящей посадке базируется отрезной диск 5 и с помощью фланца 6 закрепляется на ней.

4.1.2. Определение исходных параметров колебательной системы экспериментальной распиловочной секции

Для установления необходимых условий и режимов возбуждения колебательной системы созданной распиловочной секции, а также математического описания процесса ее функционирования необходимо располагать рядом исходных данных. В частности, собственной частотой колебательной системы, допустимым значением амплитуды колебательных смещений узла качания стрелы, характеристиками упругих ограничителей, зависимостью между статическим усилием прижатия опорного винта к нижнему ограничителю и угловым положением противовеса.

Для получения количественной зависимости (характеристики) между угловым положением рычага стрелы с противовесом относительно горизонтальной оси и величиной создаваемого им статического усилия (Рст.в) прижатия стрелы к нижнему ограничителю использовалась следующая методика. На месте регулировочного винта закреплялся специально изготовленный тензометрический динамометр (рисунок 4.7).

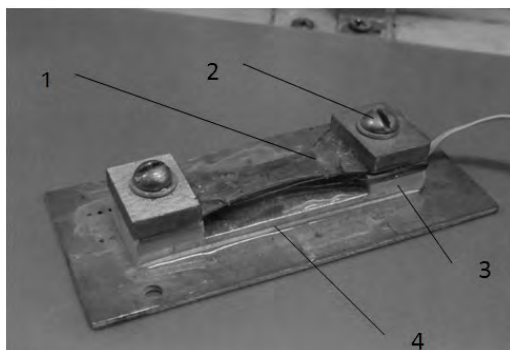


Рис. 4.7. Тензометрический динамометр:

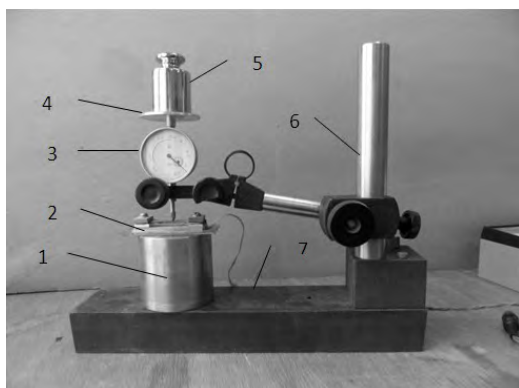
1 – стальная балка; 2 – накладка; 3 – выступы корпуса; 4 – монтажная планка

Он состоит из упругой закаленной стальной (сталь 65Г) балки 1 равного сопротивления, которая по концам с помощью накладок 2 закрепляется на плоских выступах корпуса 3, жестко связанного с монтажной планкой 4. На расстоянии 5 мм от мест закрепления балки на ее противоположных поверхностях попарно наклеены четыре фольговых тензодатчика (базой 5 мм и номинальным сопротивлением 300 Ом), включенных по мостовой схеме. К основанию установки динамометр прикрепляется в положении, при котором регулировочный винт стрелы контактирует с верхней поверхностью балки в среднем по ее длине сечении. Сигнал с тензодатчиков, величина которого пропорциональна значению $P_{ст.в}$, поступает на вход усилителя и далее на цифровой вольтметр В7-53, а также на двухкоординатный самописец ЭНДИМ-622.01 или цифровой записывающий осциллограф CWINTEK GDS-71152A [135].

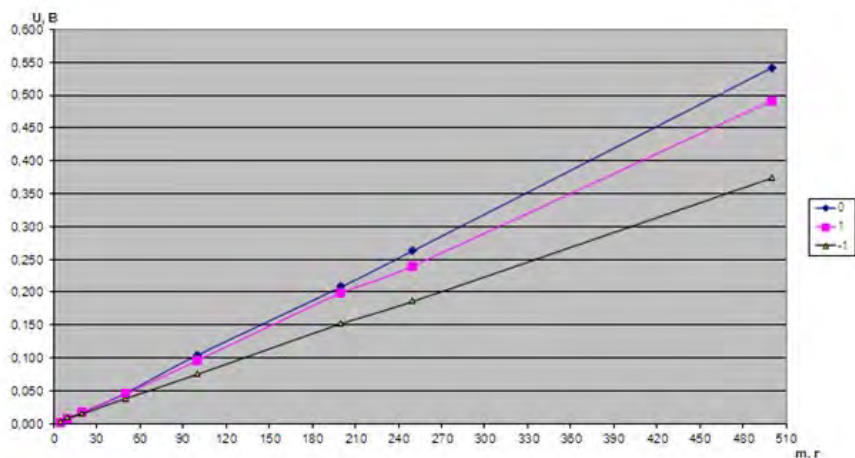
Тарировка измерительной системы производилась следующим образом (рисунок 4.8). Тензометрический динамометр 2 неподвижно устанавливается на массивной опоре 1. На магнитной стойке 6, связанной со стальной плитой 7, закрепляется индикатор часового типа 3 (ИЧ-10) (в конструкцию которого были внесены следующие изменения: снята пружина, создающая измерительное усилие), а на верхнем конце подвижного наконечника закреплялась изготовленная из легкого сплава Д16Т площадка 4, предназначенная для установки на ней аттестованных грузов 5. На рабочем конце стержня индикатора закреплялся сферический измерительный наконечник, чем обеспечивался его точечный контакт с поверхностью тензометрической балки.

Тарировка системы проводилась как с дискретным увеличением массы аттестованных грузов (прямой ход), так и при ее снижении (обратный ход). При этом нагружение балки динамометра проводилось в трех по ее длине сечениях: посередине и на расстоянии 5 мм по обе стороны от него. Максимальное значение $P_{ст.в}$ составляло 15 Н. За окончательное значение выходного сигнала принималось его среднее значение, полученное при прямом и обратном нагружении динамометра. Как показали результаты измерений, тарировочные графики, полученные при нагружении балки динамометра в трех по ее длине сечениях, отличаются между собой не более чем на 4–5 %. Поэтому в качестве основной (рабочей) характеристики системы была принята тарировочная зависимость, полученная при

нагрузении балки в ее среднем сечении, при которой одному вольту выходного сигнала соответствует 1 Н статической нагрузки.



а)



б)

Рис. 4.8. Тарировка тензометрического динамометра: а) устройство для тарировки тензометрического динамометра; б) тарировочный график тензометрического динамометра; – массивная опора; 2 – тензометрический динамометр; 3 – индикатор часового типа; 4 – площадка; 5 – аттестованный груз; 6 – магнитная стойка; 7 – стальная плита

Аналогичным образом определялись значение коэффициента жесткости нижнего упругого ограничителя, с той только разницей, что он устанавливался на месте тензометрической балки 2 (рисунок 4.8), а используемый индикатор 3 имел пружину, создающую измерительное усилие. По результатам экспериментов в качестве рабочих были приняты следующие значения жесткости: 3560 Н/м – для нижнего и 10680 Н/м – для верхнего упругих ограничителей [136].

Для измерения углового положения поворотного рычага стрелы относительно горизонтальной оси, которое определяет величину статического (гравитационного) усилия прижатия регулировочного винта стрелы к нижнему ограничителю, распиловочная секция была дополнена следующими элементами (рисунок 4.9).

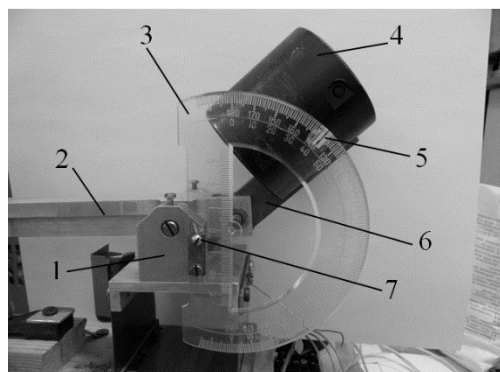


Рис. 4.9. Устройство для определения углового положения узла противовеса:
1 – кронштейн; 2 – стрела; 3 – транспортир; 4 – противовес; 5 – белая метка;
6 – поворотный рычаг; 7 – винт

К боковой поверхности кронштейна 1 узла качания стрелы 2 с помощью двух винтов 7 в вертикальном положении прикрепляется транспортир 3, изготовленный из прозрачной пластмассы. На поверхности противовеса 4, установленного на поворотном рычаге 6, напротив шкалы транспортира и на расстоянии 1 мм от его поверхности закреплена белая метка 5, с помощью которой определяется угловое положение рычага.

Это позволило с использованием тензометрического динамометра экспериментально определить численные значения статического усилия ($P_{ст.в}$) прижатия регулировочного (опорного) винта стрелы к нижнему ограничителю и численные значения статического усилия ($P_{ст}$) прижатия заготовки к диску при различных углах γ установки поворотного рычага относительно горизонтальной оси. Результаты этих измерений приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значение статического усилия прижатия опорного винта стрелы к нижнему ограничителю ($P_{ст.в}$) и прижатия заготовки к диску ($P_{ст}$) при различных углах (γ) установки поворотного рычага на стреле

Значение угла γ , град	Значение $P_{ст.в}$, Н	Значение $P_{ст}$, Н
90	6,5	3,2
70	4,2	2,1
50	2,2	1,1
40	1,2	0,6

Чтобы обеспечить наиболее эффективный и управляемый с точки зрения решаемых технологических задач режим работы колебательной системы, необходимо с учетом ее упруго-инерционных и диссипативных характеристик, определить рациональные условия ее возбуждения. В первую очередь, речь идет об установлении оптимального частотного диапазона вынужденных колебаний f , который зависит от значения частоты собственных колебаний системы f_0 .

Для ее определения использовалась методика [137], основанная на регистрации параметров свободного движения колебательной системы, которое представляет собой затухающие колебания с постоянной частотой f_0 . У них величина размаха асимптотически приближается к нулю. С целью получения искомой осциллограммы в проведенных экспериментах использовался индукционный датчик, представляющий собой катушку 1 (рисунок 4.10) из медного провода ПЭВ-2, намотанного на намагниченный сердечник [138].

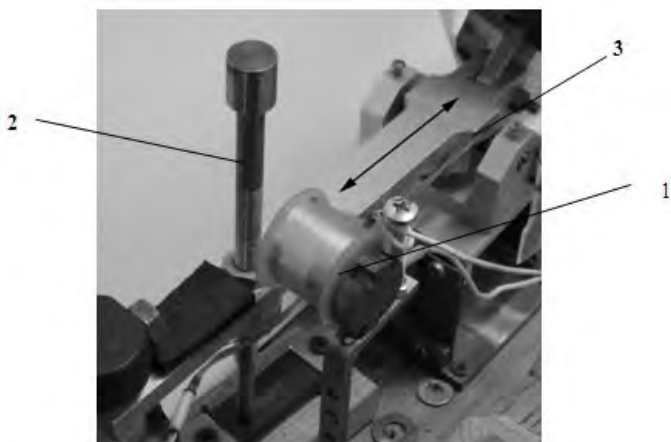


Рис. 4.10. Расположение индукционного датчика относительно опорного винта стрелы: 1 – индукционный датчик; 2 – регулировочный винт; 3 – стрела

Она неподвижно прикреплялась к основанию секции в таком положении, чтобы регулировочный винт 2 стрелы 3 располагался посередине ее торцевой поверхности на расстоянии 5–7 мм. При перемещении стрелы 3 вместе с регулировочным винтом 2 в магнитном поле, создаваемым намагниченным сердечником катушки, в которой наводилась ЭДС, фиксируемая с помощью двухкоординатного самописца ЭНДИМ-622.01. По полученной записи и с учетом скорости горизонтальной развертки определялся период свободных колебаний системы T и затем рассчитывалась частота ее собственных колебаний f_0 ($f_0 = 1/T$).

Выполнялись эти измерения при снятом приводе вращения эксцентрика в следующей последовательности. С помощью тонкой нити один конец которой закреплялся к верхней (подвижной) части упругого параллелограммного подвеса, путем приложения усилия ко второму концу нити, осуществлялась его упругая деформация на величину 3–4 мм. После этого нить отпускалась, и узел стрелы совершал свободные колебания, параметры которых фиксировались на бумажном носителе самописца (рис. 4.11)

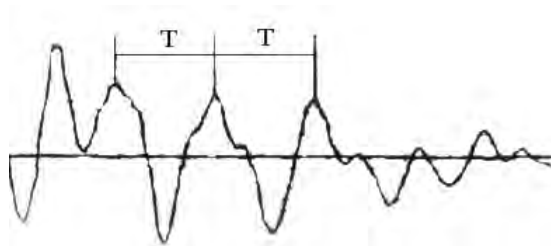


Рис. 4.11. Запись свободного движения узла стрелы распиловочной секции при $P_{\text{ст.в}}=1,2$ Н

Из нее видно, что свободное движение стрелы представляет собой затухающие по амплитуде колебания при практически постоянном значении их периода T . С помощью данной методики были определены значения частоты собственных колебаний узла стрелы в зависимости от статического усилия прижатия ($P_{\text{ст}}$) ее регулировочного винта к нижнему ограничителю. Экспериментально установлено, что по мере увеличения $P_{\text{ст.в}}$ частота собственных колебаний узла стрелы снижается с 10 Гц при $P_{\text{ст.в}} = 1,2$ Н до 8 Гц при $P_{\text{ст.в}} = 6,5$ Н. Объясняется это тем, что увеличение усилия прижатия опорного винта к резиновому ограничителю приводит к повышению сил трения, действующих при их относительном скольжении, что равносильно возрастанию коэффициента демпфирования в колебательной системе, а это, как известно [137], обуславливает снижение частоты ее собственных колебаний.

Полученные результаты позволяют определить наибольшую частоту вынужденных колебаний, сообщаемых системе с помощью эксцентрика, а соответственно допустимую частоту его вращения. Так, для обеспечения дорезонансного (рабочего) режима работы колебательной системы необходимо, чтобы частота вынужденных колебаний была ниже частоты ее собственных колебаний. В нашем случае, когда диапазон f_0 составляет 8–10 Гц, частота вынужденных колебаний не должна превышать 5 Гц, что соответствует частоте вращения эксцентрика 240–300 мин⁻¹.

Важным параметром предложенной колебательной системы, влияющим на режим ее работы, в частности на значение f_0 , является величина коэффициента жесткости упругого подвеса стрелы. Для стабильной работы системы величина этого коэффициента для принятых условий ее возбуждения должна быть постоянной, т.е. чтобы

обеспечивалась линейная зависимость между усилием P_x , вызывающим деформацию упругого подвеса, и ее величиной δ .

Для измерения этих параметров в работе использовалась простая методика [138], которая поясняется рис. 4.12, с использованием следующих аппаратных средств.

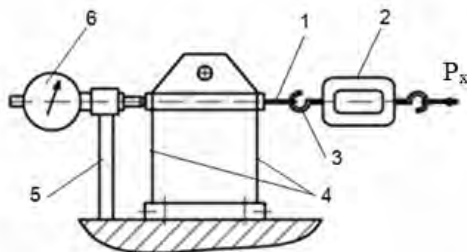


Рис. 4.12. Схема, поясняющая методику определения жесткости упругого подвеса узла стрелы: 1 – нить; 2 – электронный динамометр; 3 – зацеп; 4 – упругий подвес; 5 – стойка; 6 – индикатор часового типа

Один конец нити 1 закреплялся в верхней (подвижной) части упругого подвеса 4, а второй – на зацепе 3 электронного динамометра 2 с ценой деления 0,1 Н. Путем приложения усилия растяжения (P_x) к его противоположному зацепу, величина которого фиксировалась по показаниям динамометра, осуществлялась упругая деформация подвижной части подвеса. Ее величина (δ) измерялась с помощью индикатора часового типа 6 (ИЧ-10), закрепленного на стойке 5.

Анализ экспериментально полученной зависимости упругой деформации подвеса стрелы от усилия его нагружения показал, что на ней имеется начальный линейный участок, который сохраняется до значения деформации порядка 3,5 мм. Отсюда следует важный практический вывод о том, что для примененного в работе упругого подвеса амплитуда сообщаемых ему вынужденных колебаний, т.е. значение эксцентриситета эксцентрика, не должна превышать указанную величину его деформации.

Измерение частоты вращения распиловочного (отрезного) диска при различном напряжении питания электродвигателя осуществлялось с помощью стробоскопического тахометра Testo 465. При этом в ходе проведения экспериментов использовали максимальное зна-

чение напряжения питания электродвигателя ($U = 27$ В), при котором частота вращения диска составляла 7500 мин^{-1} , что соответствует окружной скорости вращения диска 27 м/с , которая выбрана из рекомендованного интервала $25\text{--}30 \text{ м/с}$ [4].

4.1.3. Определение рационального варианта колебательной системы экспериментальной распиловочной секции

В разработанной конструкции распиловочной секции предусмотрены два варианта колебательной системы, в частности с использованием только одного нижнего ограничителя и с применением дополнительного верхнего ограничителя. В связи с этим необходимо было на основании сравнительных испытаний определить рациональный вариант колебательной системы, обеспечивающий гарантированно управляемое двухмерное циркуляционное движение заготовки.

В отличие от одномерных (однонаправленных) колебаний измерение параметров двухмерного циркуляционного движения заготовки представляет достаточно сложную задачу. Главным образом это связано с отсутствием соответствующих измерительных средств, позволяющих одновременно фиксировать траекторию этого движения и измерять ее параметры. Поэтому для получения в ходе проведения исследований объективных и достоверных данных важно разработать методику и аппаратные средства, позволяющие измерять параметры циркуляционного движения заготовки.

4.1.3.1. Разработка методики измерения параметров циркуляционного движения заготовки

Для определения с достаточной для технологического использования точностью траектории движения заготовки и измерения ее параметров был применен бесконтактный метод, основанный на фиксировании траектории движения светящейся точки, принадлежащей заготовке, совершающей двухмерное циркуляционное движение [139, 140]. Для его реализации в отверстие на свободном конце оправки 1 (рисунок 4.13), на противоположном конце которой закреплялась заготовка, устанавливался светодиод. На него надевалась диафрагма 2 с проходным отверстием $0,5 \text{ мм}$, обеспечи-

вающая формирование светящейся точки 3. Движение последней оправдано рассматривать как движение точки, принадлежащей обрабатываемой заготовке.

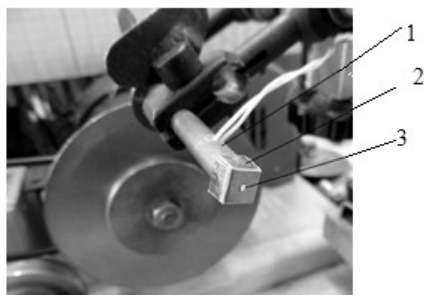


Рис. 4.13. Оправка, примененная для визуализации траектории движения точки, принадлежащей заготовке: 1 – оправка; 2 – диафрагма; 3 – светящаяся точка

Перемещение полученной светящейся точки фиксировалось с помощью цифрового фотоаппарата с функцией макросъемки для фокусировки на данной точке, а также функцией приоритета выдержки фотографии, для того чтобы период открытия диафрагмы объектива совпадал или незначительно превышал период циркуляционного движения заготовки. В этом случае траектория движения точки отображается на световоспринимающей матрице фотоаппарата в виде яркой замкнутой кривой, соответствующей траектории циркуляционного движения заготовки. В качестве примера на рис. 4.14 представлены полученные с использованием данной методики фотографии траектории двумерного циркуляционного движения заготовки при нескольких значениях частоты возбуждения узла качания стрелы.

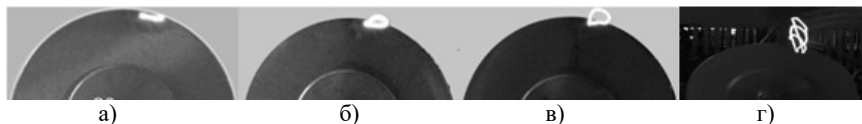


Рис. 4.14. Траектории циркуляционного движения заготовки при различной частоте вынужденных колебаний при отсутствии верхнего ограничителя:
а – $f = 2$ Гц; б – $2,8$ Гц; в – $3,6$ Гц; г – 4 Гц

Из них видно, что данный технологический параметр существенным образом влияет на форму траектории циркуляционного движения заготовки. Параметры зафиксированных траекторий определялись путем обработки полученных снимков в программной среде Photoshop с помощью инструмента «Измерение», с использованием которого определялся как размер распиловочного диска (при его известном диаметре), так и геометрические параметры траектории.

С целью определения направления перемещения заготовки вдоль циркуляционной траектории дополнительно к фотосъемке выполнялась последующая видеофиксация процесса перемещения заготовки тем же фотоаппаратом. Результирующий видеофайл с помощью программы VirtualDub v. 1.4 представлялся в виде серии покадровых картинок, фиксирующих последовательное изменение положения заготовки в плоскости распиливания с шагом 50 мс, что наглядно иллюстрируется на рис. 4.15, где заготовка совершает циркуляционное движение против часовой стрелки.

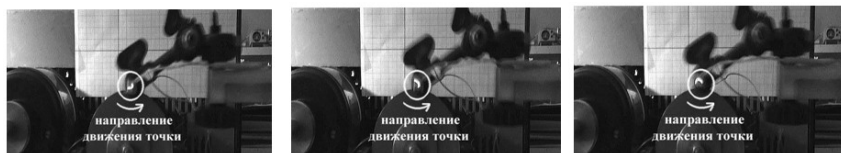


Рис. 4.15. Серия покадровых фотографий, определяющих направление циркуляционного движения заготовки

4.1.3.2. Экспериментальная оценка влияния условий и режимов возбуждения колебательной системы распиловочной секции на параметры циркуляционного движения заготовки

В качестве параметров режима возбуждения колебательной системы были приняты: частота сообщаемых ей вынужденных колебаний f , которая определяется частотой n вращения эксцентрика, статическое усилие $P_{ст.в}$ прижатия опорного винта стрелы к нижнему ограничителю, которое зависит от углового положения рычага с противовесом. Величина амплитуды A_0 вынужденных колебаний, определяемая значением эксцентриситета эксцентрика, была посто-

янной и составляла 3,5 мм. Под условиями возбуждения колебательной системы в данном случае понимаются два варианта ее функционирования, т.е. с одним нижним ограничителем вертикального перемещения или с двумя (с нижним и верхним).

Как показали эксперименты [134], при возбуждении колебательной системы (без взаимодействия заготовки с диском), работающей по первому варианту, в зависимости от частоты f и значения $P_{ст.в}$ заготовка может совершать движение с различной формой его траектории. Так, с повышением f от 0,7 до 2,8 Гц при всех значениях $P_{ст.в}$ траектория движения заготовки представляет линию, практически параллельную горизонтальной оси (рисунок 4.14а), т.е. она совершает одномерное колебательное движение. Такой характер ее движения наблюдается при безотрывном режиме взаимодействия опорного винта стрелы с нижним ограничителем, когда амплитуда его вертикальных колебаний, обусловленная действием на стрелу переменного динамического момента, не превышает величину предварительного натяга в системе, т.е. величину деформации упругого ограничителя за счет статического прижатия к нему опорного винта с усилием $P_{ст.в}$. По мере увеличения f и снижения $P_{ст.в}$ указанное неравенство постепенно уменьшается, и при определенном сочетании значений f и $P_{ст.в}$ оно изменяется на противоположное, что сопровождается отрывом опорного винта от ограничителя и формированием двухмерного движения заготовки (рис. 4.14б, в). Наиболее выраженному двухмерному движению заготовки соответствуют наибольшая частота $f = 3,6$ Гц и наименьшая величина нагрузки $P_{ст.в} = 1,2$ Н (рисунок 4.14в). Однако при этих условиях возбуждения колебательной системы может происходить явление ее «затягивания» на виброударный режим по амплитуде (рисунок 4.14г) [92, 141], что приводит к нежелательным последствиям, связанным с «зависанием» стрелы или ее опрокидыванием.

Очевидно, для предотвращения этого явления и одновременно его целенаправленного технологического использования оправдано применять второй из исследуемых вариантов колебательной системы. То есть применить верхний ограничитель, который в совокупности с нижним должен обеспечить режим двухстороннего виброударного взаимодействия с ними стрелы распиловочной секции.

Для подтверждения этого путем покадрового анализа видеосъемки (с временным интервалом между кадрами 0,005 с) опреде-

лены характерные стадии движения стрелы секции при виброударном режиме ее взаимодействия с упругими ограничителями, которые иллюстрируются фотографиями, приведенными на рис. 4.16.

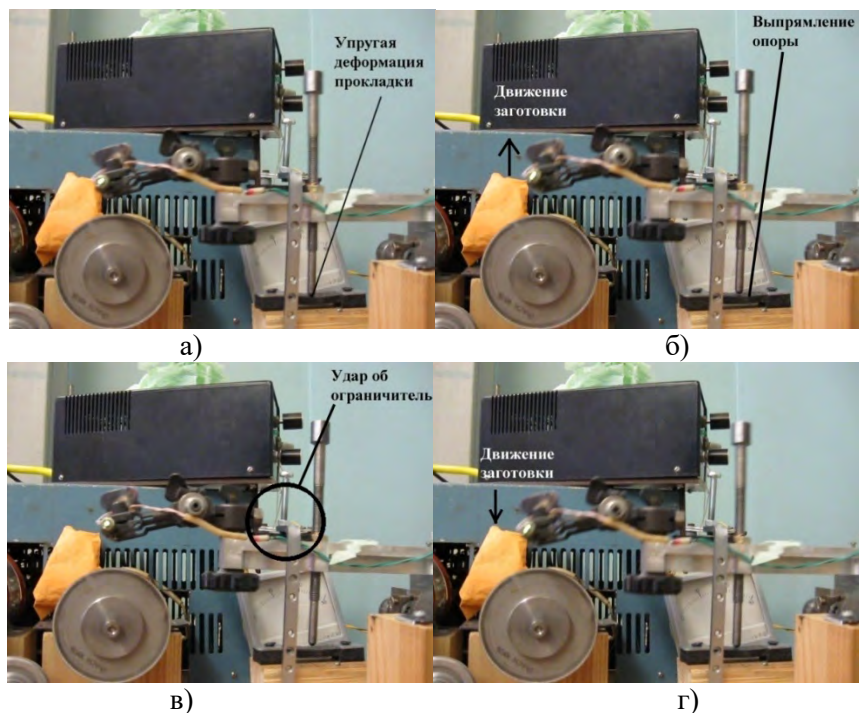


Рис. 4.16. Серия покадровых фотографий положения стрелы при ее виброударном взаимодействии с упругими ограничителями: а – исходное положение (без возбуждения системы); б – отрыв опорного винта от нижнего ограничителя; в – удар о верхний ограничитель; г – соударение винта с нижним ограничителем

Эта стадия продолжается до момента соударения стрелы с верхним ограничителем, в результате которого направление скорости ее вертикального перемещения скачкообразно изменяется на противоположное. Поэтому в течение следующей стадии циркуляционное движение заготовки определяется ее суммарным перемещением вниз по вертикали и в сторону по горизонтали (рисунок 4.16г). Окончанию этой стадии соответствует наступление момента соударения опорного винта с нижним ограничителем, что сопровождается

ся очередным скачкообразным изменением скорости его вертикального движения, которое заканчивается отрывом винта от нижнего ограничителя. Этому соответствует наступление первой (рисунк 4.16б) из рассмотренных стадий двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки.

Отмеченные стадии такого движения заготовки при виброударном режиме работы колебательной системы наглядно иллюстрируются на фотографии траектории ее перемещения, приведенной на рис. 4.17.

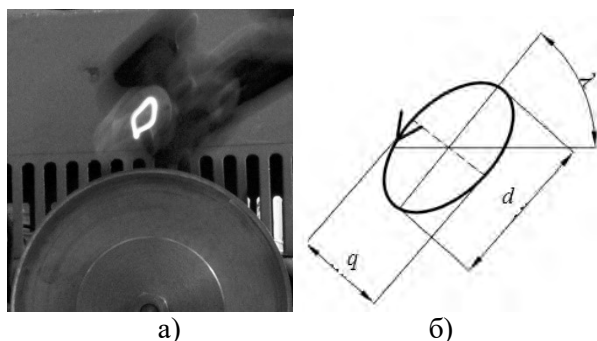


Рис. 4.17. Траектория движения светящейся точки, принадлежащей заготовке, при возбуждении колебательной системы с двумя ограничителями: а – траектория движения; б – параметры эллиптической траектории движения

Как видно, она имеет несколько отличную от эллипса форму (рисунок 4.17а), что обусловлено наличием соударений стрелы с нижним и верхним упругими ограничителями. Вместе с тем для проведения инженерных расчетов и количественной оценки траектории движения заготовки вполне оправдано аппроксимировать ее форму в виде эллипса, как показано на рис. 4.17б. Тогда для характеристики двухмерного циркуляционного движения заготовки нужно использовать следующие параметры эллипса: величину его большой d и малой q осей и угол λ наклона его большой оси к горизонтали [142].

Особо необходимо подчеркнуть то, что в рассматриваемом варианте колебательной системы по сравнению с предыдущим появляется возможность управлять параметрами двухмерного циркуляци-

онного движения заготовки за счет изменения не только частоты f и ее статического усилия $P_{ст.в.}$, но и путем регулирования зазора Z между стрелой и верхним ограничителем. Влияние указанных режимов распиливания на параметры эллиптической траектории движения заготовки подробно рассмотрено в следующей главе диссертации.

Подводя итог проведенным сравнительным испытаниям двух вариантов колебательных систем, можно констатировать, что с точки зрения обеспечения стабильного двухмерного циркуляционного движения заготовки в широком диапазоне частоты возбуждения и статического нагружения колебательной системы рациональным является вариант, в котором используются два упругих ограничителя вертикального перемещения стрелы. В этом случае, во-первых, устраняется нежелательное явление «выброса» (опрокидывания) стрелы, а во-вторых, за счет регулирования зазора между ней и верхним ограничителем можно влиять на параметры двухмерного циркуляционного движения заготовки, что расширяет возможности управления процессом распиливания.

4.1.3.3. Методика определения силовых и временных параметров контактного взаимодействия заготовки с режущей кромкой диска

Для раскрытия и описания особенностей механизма хрупкого разрушения материала заготовки, совершающей двухмерное циркуляционное движение, необходимо располагать данными, отражающими влияние его параметров на силовые и временные характеристики процесса ее контактного взаимодействия с режущей кромкой распиловочного диска. В частности, это величина нормальной составляющей силы их соударения и продолжительность их контакта за период циркуляционного движения заготовки. Следует подчеркнуть, что в совокупности эти параметры определяют уровень и характер силового воздействия на поверхность заготовки в зоне распиливания, а следовательно, они ответственны за интенсивность разрушения ее материала.

С целью определения этих параметров использовался описанный выше тензометрический динамометр 2 (рисунок 4.18), который жестко закреплялся на массивном основании 1 [135, 143, 144].

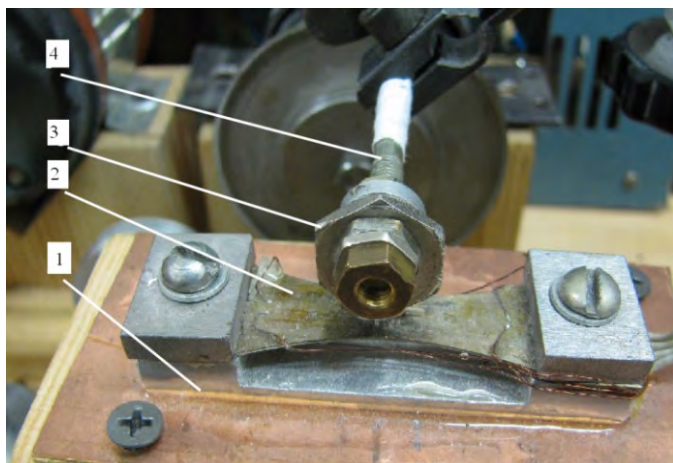


Рис. 4.18. Общий вид устройства для измерения силовых и временных параметров виброударного взаимодействия заготовки с режущей кромкой распиловочного диска: 1 – основание; 2 – тензометрический динамометр; 3 – стальной элемент (аналог заготовки); 4 – оправка

На оправке 4, установленной в зажиме узла крепления заготовки, закреплялся узкий шестигранный стальной элемент (аналог заготовки) 3, который своей вершиной контактировал с поверхностью упругой балки динамометра. При сообщении элементу двухмерного циркуляционного движения происходило ударно-фрикционное взаимодействие его вершины с поверхностью балки, т.е. имело место косое соударение с относительным скольжением контактирующих поверхностей. Сигнал с тензометрического динамометра, пропорциональный изменению нормальной составляющей силы удара P_d , поступал на усилитель и далее подавался на цифровой запоминающий осциллограф CWINTEK GDS-71152A. По полученным осциллограммам и с учетом тарировочных данных динамометра определялись характер изменения и величина нормальной составляющей силы соударения элемента с поверхностью балки динамометра за время их однократного взаимодействия, а также ее максимальное значение $P_{d\max}$.

На рис. 4.19 приведена типичная осциллограмма изменения выходного сигнала (напряжения U), соответствующая ударно-

фрикционному взаимодействию указанных элементов. По полученным осциллограммам также определялись время их контактного взаимодействия t_k и период T_c циркуляционного движения заготовки.

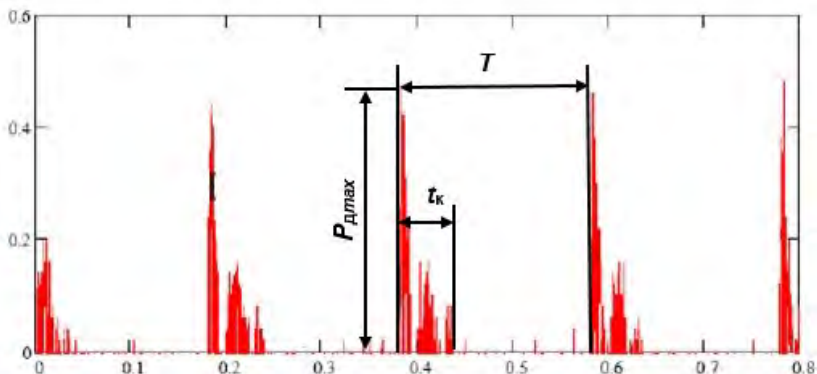


Рис. 4.19. Пример осциллограммы изменения выходного напряжения при ударно-фрикционном взаимодействии заготовки с тензобалкой динамометра

При анализе осциллограмм обращает на себя внимание то обстоятельство, что за время контактного взаимодействия поверхностей значение нормальной составляющей представляет собой совокупность импульсов с уменьшающимся, начиная с первого, значением амплитуды. Очевидно, связано это с тем, что при ударно-фрикционном взаимодействии (а это соответствует условиям косоугольного соударения тел) в упругой балке динамометра в результате возбуждения в ней собственных колебаний следующая, после начального удара, фаза относительного скольжения поверхностей сопровождается кратковременными разрывами их контакта. С учетом этого для обработки полученных осциллограмм применялся программный продукт MathCAD, в котором выполнялось сглаживание полученного сигнала и его интерполяция кубическим сплайном, что позволило вычислить среднее значение нормальной составляющей силы соударения взаимодействующих поверхностей.

Для раскрытия закономерностей влияния циркуляционного движения заготовки на процесс распиливания важно оценить степень его влияния на величину сил сопротивления, действующих в зоне обработки. В основу такой оценки положено определение измене-

ния величины силы тока якоря электродвигателя СЛ329 (привод вращения диска), которое пропорционально величине указанных сил сопротивления. Измерение силы тока якоря электродвигателя (рисунок 4.20) осуществлялось с помощью резистивного датчика R номинальным сопротивлением 1 Ом, включенным в цепи питания якоря, подключенного к источнику питания ИП [145].

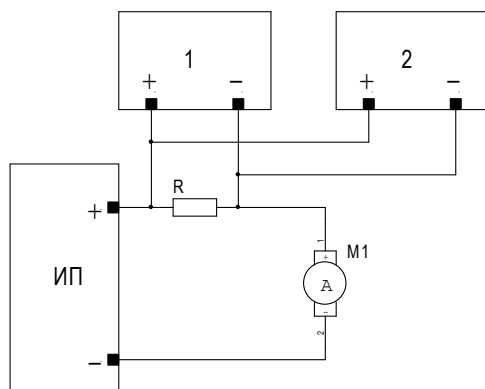


Рис. 4.20. Блок-схема измерения тока якоря электродвигателя:
1 – вольтметр; 2 – самописец

Падение напряжения на резисторе измерялось вольтметром 1 (В7-53) и регистрировалось самописцем 2 (ЭНДИМ 622.01). Влияние режимов распиливания на изменение сил сопротивления, действующих в зоне обработки, оценивалось следующим образом. При вращающемся от электродвигателя с заданной частотой диске фиксируется значение тока на якоре, т.е. на холостом ходе. В процессе распиливания значение этого параметра возрастает пропорционально действующим в зоне обработки силам сопротивления. На основе сопоставления значения силы тока на якоре электродвигателя при холостом ходе и при распиливании оценивалось влияние условий и режимов выполнения операции на изменение сил сопротивления, действующих в зоне обработки.

4.1.4. Материалы, образцы и инструменты, примененные в исследованиях

В ходе проведения экспериментальных исследований использовались образцы из следующих хрупких неметаллических материалов: корунда, яшмы, нефрита и стекла, которые соответственно имеют твердость по шкале Мооса 9, 7, 6 и 4 единиц [146, 147].

Из исходных заготовок этих материалов путем механической обработки изготавливались образцы в виде прямоугольного параллелепипеда с сечением 5х5 мм и длиной 20–25 мм (рисунок 4.21а). Выбор квадратного сечения образцов обусловлен тем, чтобы, по аналогии с обработкой кристаллов алмаза, осуществлять процесс их распиливания, начиная с поверхности ребра (рисунок 4.21в).

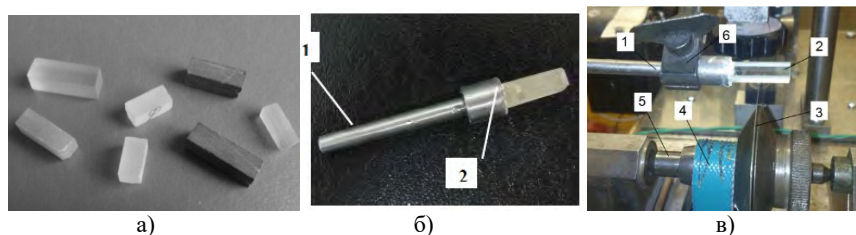


Рис. 4.21. Образцы, примененные в исследованиях:
а – общий вид образцов, б – оправка с вклеенным в ней образцом; в – начало процесса распиливания;
1 – оправка; 2 – образец; 3 – диск; 4 – ремень; 5 – привод; 6 – зажим

Для установки образца в узле крепления распиловочной секции использовалась цилиндрическая оправка 1 (рисунок 4.23б), в отверстии которой с помощью фиксирующего цемента «Уницем» закреплялся образец 2. Оправка закреплялась в зажимном приспособлении стрелы распиловочной секции таким образом, чтобы процесс распиливания образца начинался с поверхности ребра (рисунок 4.21в).

В качестве инструмента для распиливания образцов использовался стальной отрезной диск толщиной 0,23 мм, диаметром 76 мм, имеющий на периферийной части двустороннее, в виде кольцевой дорожки шириной 2,5 мм, алмазосодержащее покрытие из микро-

порошка АСН 60/40, полученное методом гальваностегии (рисунок 4.22).



Рис. 4.22. Отрезной диск, примененный в исследованиях

Использование такого инструмента, обладающего высокой режущей способностью, стойкостью и значительной жесткостью к деформации продольного изгиба, позволило проводить сравнительные испытания по распиливанию образцов из одного материала одним инструментом.

Продолжительность выполнения операции определялась по показаниям секундомера, который запускался при начале процесса распиливания образца и останавливался в момент его разделения на части.

Интенсивность распиливания i определялась отношением площади F распиленной поверхности образца ко времени обработки t ($i = F/t$, мм²/с).

После распиливания образцов на полуфабрикаты исследовалось качество обработанных поверхностей. В частности, с помощью профилометра-профилографа фирмы Taylor Hobson измерялась их шероховатость в направлении, совпадающем с движением гравитационной подачи. Состояние топографии обработанной поверхности визуально оценивалось по фотографиям, полученным с помощью микроскопа МПСУ-1, оснащенного цифровой фотокамерой.

Для сбора продуктов обработки и их последующего размерного анализа использовали липкую ленту, которая крепилась в непосредственной близости от зоны распиливания образца.

Методики выполнения отдельных экспериментов и их результаты рассмотрены в разделах 4.2 и 4.3.

4.1.5. Последовательность выполнения экспериментов

В ходе выполнения каждого эксперимента производились следующие действия:

- отрезной диск устанавливался на валу электродвигателя;
- подлежащий распиливанию образец закреплялся в оправках в узле крепления на стреле;
- путем придания рычагу противовеса соответствующего углового положения, устанавливалось требуемое значение статического усилия прижатия образца к диску;
- с помощью концевых мер длины устанавливалась необходимая величина зазора между стрелой и верхним ограничителем;
- по показаниям вольтметра, включенного в цепь питания электродвигателя привода вращения эксцентрика, устанавливалась требуемая частота его вращения, которая соответствует частоте возбуждения колебательной системы распиловочной секции;
- включался привод вращения отрезного диска, затем путем медленного выворачивания регулировочного винта стрелы заготовка плавно подавалась на режущую кромку отрезного диска и в момент начала процесса врезания запускался секундомер и включался привод вращения эксцентрика;
- по мере увеличения глубины пропила опорный винт стрелы периодически выворачивался, а регулировочный винт верхнего ограничителя соответственно вворачивался;
- в момент завершения операции, т.е. разделения образца на части, останавливался секундомер, фиксирующий продолжительность ее выполнения t , останавливались и отключались все приводы распиловочной секции;
- с помощью микроскопа МПСУ-1 определялись размеры площадок распиленных образцов и вычислялась их фактическая площадь F , после чего находилось значение интенсивности распилива-

ния образца $i = F/t$ (мм²/с), останавливались и отключались все приводы распиловочной секции.

Каждый из образцов вначале распиливался в обычных условиях выполнения операции, а затем по предложенной технологии. При неизменных режимах обработки распиливание образца из данного материала осуществлялось не менее пяти раз, а интенсивность распиливания определялась как среднее арифметическое полученных при этом ее значений.

4.1.6. Методика обработки экспериментальных данных

Обработку результатов измерений производили с использованием стандартных методик [148]. Нижеприведенные обозначения параметров соответствуют [148] и применяются только в рамках настоящего раздела. В качестве примера рассмотрим методику обработки результатов измерений шероховатости обработанных поверхностей: образца из стекла, распиленного при $P_{ст} = 6,5$ Н, $f = 4$ Гц, $Z = 2$ мм.

Для проверки гипотезы о нормальном распределении результатов измерения производили не менее 20 раз. Результаты измерений приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений шероховатости обработанных поверхностей образцов

№ измерения	Шероховатость R_a , мкм
1	5,72
2	5,68
3	5,66
4	5,79
5	5,75
6	5,71
7	5,81
8	5,71
9	5,69
10	5,77
11	5,75
12	5,74

№ измерения	Шероховатость R_a , мкм
13	5,65
14	5,68
15	5,69
16	5,71
17	5,72
18	5,67
19	5,75
20	5,67
21	5,72

Последовательность обработки результатов измерений включает в себя следующие действия:

- 1) вычисление среднего значения результатов измерений

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где n – количество измерений;

- 2) вычисление несмещенной оценки для среднеквадратического отклонения результатов

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}};$$

- 3) вычисление смещенной оценки для среднеквадратического отклонения результатов

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}};$$

4) вычисление отношения d , определяемого формулой

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{nS^*};$$

5) результаты измерений могут считаться распределенными нормально, если выполняется условие

$$d_{1-\frac{q_1}{2}} < d < d_{\frac{q_1}{2}}, \quad (4.1)$$

где $d_{1-\frac{q_1}{2}}$, $d_{\frac{q_1}{2}}$ – квантили составного распределения с n степенями свободы [148, табл.1];

6) если условие (4.1) выполняется, вычисляем доверительный интервал

$$\varepsilon = t_p S, \quad (4.2)$$

где t_p – значение квантиля t -распределения Стьюдента с $n - 1$ степенями свободы.

Результаты обработки экспериментальных данных по описанной методике приведены в таблице 4.3.

При $q_1/2 = 5\%$, $n = 20$ имеем $d_{1-\frac{q_1}{2}} = 0,7304$, $d_{\frac{q_1}{2}} = 0,8768$.

Так как условие (4.1) выполняется, то распределение результатов измерений может считаться нормальным. Величина доверительного интервала, вычисленная по формуле (4.2), составляет 0,02 мкм. Коэффициент Стьюдента при $P = 95\%$, $n = 21$ составляет $t_p = 2,086$.

Таким образом, результат измерений может быть представлен в виде: $R_a = (5,72 \pm 0,02)$ мкм с достоверностью 95 %.

Таблица 4.3 – Результаты обработки экспериментальных данных

Наименование параметра	Значение параметра
Среднее значение, мкм	5,72
Несмещенная оценка среднеквадратического отклонения, мкм	0,01
Смещенная оценка среднеквадратического отклонения, мкм	0,04
Отношение d	0,81

4.2. Теоретико-экспериментальные исследования влияния циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания и качество обработанных поверхностей

В ходе проведения теоретических исследований необходимо было решить следующие задачи: получить теоретические зависимости, описывающие влияние упруго-инерционных и диссипативных характеристик колебательной системы, а также режимов ее возбуждения на параметры циркуляционного движения заготовки; исследовать влияние параметров циркуляционного движения заготовки на кинематику и динамику ее взаимодействия с распиловочным диском и на основании выявленных особенностей его протекания получить теоретические зависимости, позволяющие оценить степень влияния параметров циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания и качество обработанных поверхностей.

4.2.1. Математическое описание траектории циркуляционного движения заготовки при сообщении узлу качания стрелы вынужденных колебаний

Для теоретического исследования характера циркуляционного движения заготовки воспользуемся расчетной схемой [149, 150], приведенной на рис. 4.23.

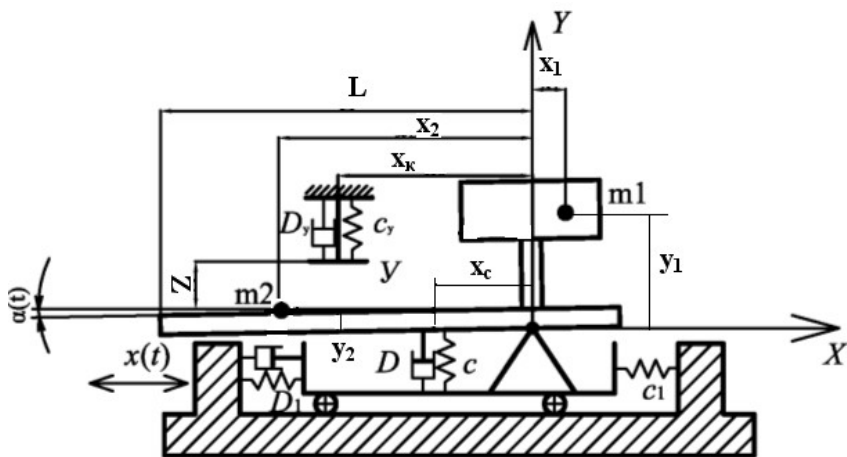


Рис. 4.23. Расчетная схема для математического описания движения заготовки при сообщении ей колебаний циркуляционного типа

Она включает абсолютно жесткую невесомую стрелу, имеющую возможность поворота относительно оси ее качания, установленную на шариковых направляющих, связанных с основанием парой пружин, общей жесткостью c_1 и демпфером с коэффициентом пропорциональности D_1 , моделирующих плоскопараллелограммный подвес. Оси координат X и Y пересекаются на оси поворота стрелы и направлены, как показано на рис. 4.1. Масса противовеса m_1 сосредоточена в точке с координатами x_1 и y_1 , а масса оставшейся части системы m_2 – в точке с координатами x_2 и y_2 . Изменение положения стрелы относительно горизонта фиксируется углом $\alpha(t)$ между образующей стрелы и осью X . За положительное направление поворота стрелы принято ее движение против часовой стрелки. Повороту стрелы препятствует упругая пружина с коэффициентом пропорциональности c , а также демпфер колебаний с коэффициентом пропорциональности D , расположенные на расстоянии x_c от оси вращения стрелы. Кроме того, в системе предусмотрен верхний ограничитель Y , представляющий собой упругую пружину с коэффициентом пропорциональности c_y , а также демпфер колебаний с коэффициентом пропорциональности D_y , установленный на расстоянии x_k от оси вращения стрелы, а между его рабочей поверхностью

и верхней плоскостью стрелы, в случае ее установки строго горизонтально предусмотрен зазор Z , величина которого может регулироваться.

Для упрощения расчетов в схеме (рис. 4.23) действие кулачкового механизма на пружинный параллелограмм заменено перемещением стрелы в направлении оси X , выражаемое согласно [103], формулой (при условии, что отрыва кулачка от пружинного параллелограмма не происходит):

$$x(t) = \frac{\omega_0^2 A_0 \cos(\omega t + \pi - \varphi)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4D_1^2 \omega^2}} \quad (4.3)$$

где $x(t)$ – перемещение конца стрелы в направлении оси X за время t ;

ω_0 – собственная частота плоскопараллелограммного подвеса;

A_0 – амплитуда перемещения в горизонтальном направлении;

ω – круговая частота вращения кулачкового механизма;

φ – смещение фазы колебаний, зависящее от начального положения кулачка;

D_1 – коэффициент демпфирования плоскопараллелограммного подвеса.

Если распиливание не осуществляется, то дифференциальное уравнение движения стрелы в условиях ее перемещения вдоль основания с учетом контакта с ограничителем $У$ будет выражаться как

$$\begin{aligned} M_{\text{вр}} = & \ddot{\alpha}(t) - \frac{KD}{J} \cdot [\cos(\alpha(t)) \cdot \dot{\alpha}(t)] x_c - \frac{Kc}{J} \sin(\alpha(t)) \cdot x_c + \frac{K_1 D_y}{J} \times \\ & \times \left[\cos\left(\left|\alpha(t)\right| - \left|\arctg\left(\frac{Z}{x_k}\right)\right|\right) \cdot \dot{\alpha}(t) \right] \cdot x_k + \frac{K_1 c_y}{J} \cdot \sin\left(\left|\alpha(t)\right| - \left|\arctg\left(\frac{Z}{x_k}\right)\right|\right) \times \\ & \times x_k - m_1 \sqrt{x_1^2 + y_1^2} + m_2 \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $M_{\text{вр}}$ – момент вращения, возникающий со стороны противовеса при перемещении системы вдоль основания;

$\alpha(t)$ – угол поворота стрелы за время t относительно оси Y ;

K – поправочный коэффициент, учитывающий действие нижних пружины и буфера только при их контакте со стрелой;

D – коэффициент пропорциональности демпфера колебаний нижнего ограничителя;

J – момент инерции системы относительно оси качания стрелы;

x_c – расстояние между осью вращения стрелы и демпфером нижнего ограничителя (рисунок 4.1);

c – жесткость пружины нижнего ограничителя;

K_1 – поправочный коэффициент, учитывающий действие пружины и буфера только при контакте стрелы с верхним ограничителем;

D_y – коэффициент пропорциональности демпфера колебаний верхнего ограничителя;

Z – зазор между стрелой и верхним ограничителем при ее установке в строго горизонтальном положении;

x_k – расстояние между осью вращения стрелы и демпфером верхнего ограничителя (рисунок 4.1);

m_1 – масса противовеса;

x_1, y_1 – расстояния от оси вращения стрелы до точки сосредоточения массы m_1 по осям X и Y соответственно (рисунок 4.1);

m_2 – масса системы без учета массы противовеса;

x_2, y_2 – расстояние от оси вращения стрелы до точки сосредоточения массы m_2 по осям X и Y соответственно (рисунок 4.1).

Момент вращения, возникающий со стороны противовеса при перемещении системы вдоль основания, рассчитывается по формуле

$$M_{\text{вр}} = \ddot{x}(t) \left(m_1 \sin(\arctg(\frac{y_1}{x_1}) + \alpha_0 + \alpha(t)) \sqrt{x_1^2 + y_1^2} + \right. \\ \left. + m_2 \sin(\arctg(\frac{y_2}{x_2}) - \alpha_0 - \alpha(t)) \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \right), \quad (4.5)$$

где α_0 – начальный угол наклона стрелы, обусловленный действием статической нагрузки (угол равновесного положения стрелы).

При этом α_0 рассчитывается по формуле

$$\alpha_0 = \arcsin \left(\frac{m_2 g \sqrt{(x_2^2 + y_2^2)} - m_1 g \sqrt{(x_1^2 + y_1^2)}}{cx_c^2} \right), \quad (4.6)$$

где g – ускорение свободного падения.

Момент инерции системы относительно оси качания стрелы находим как

$$J = m_2 (x_2^2 + y_2^2) + m_1 (x_1^2 + y_1^2). \quad (4.7)$$

Значения поправочных коэффициентов K и K_1 рассчитаем следующим образом:

$$\begin{cases} K = 1, \alpha(t) \geq \alpha_0; \\ K = 0, \alpha(t) < \alpha_0; \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\begin{cases} K_1 = 0, \alpha(t) \geq -\arctg(Z / x_K); \\ K_1 = 1, \alpha(t) < -\arctg(Z / x_K). \end{cases} \quad (4.9)$$

Тогда перемещение конца стрелы вместе с заготовкой вдоль оси Y будет выражаться формулой

$$y(t) = L \cdot \sin(\alpha(t) + \alpha_0), \quad (4.10)$$

где $y(t)$ – перемещение конца стрелы вдоль оси Y за время t ;

L – длина стрелы;

α_0 – угол равновесного положения стрелы.

Для численного решения методом Рунге – Кутты уравнения (4.4) был разработан программный код в среде MathCAD. Начальные условия для этого

$$\begin{cases} \alpha(0) = \alpha_0; \\ \alpha'(0) = 0. \end{cases} \quad (4.11)$$

Число шагов, на которых находилось решение, принималось равным 1000, а конечный промежуток времени расчета составлял одну секунду, что позволило исследовать движения стрелы с временной дискретизацией, составлявшей 0,001 с. Результатом численного решения уравнения (4.4) являлась матрица, отражающая изменение как значения, так и скорости варьирования угла α в интервале времени от 0 до 1 с. Полученные данные в программном коде проверялись как на отрыв стрелы от пружины и демпфера (т.е. выполнение условия $\alpha(t) < 0$), так и на контакт с верхним ограничителем $У$ (т.е. выполнение условия $\alpha(t) < -\arctg(Z/x_k)$), моменты наступления которых во времени сравнивались, и за действительный принимался случай, который наступает раньше. Если раньше наступал отрыв стрелы от пружины и демпфера, то выполнялась корректировка значения коэффициента K в формуле (4.4), при этом за начальные данные принимали значения угла $\alpha(t)$, полученные из анализируемых данных в момент отрыва стрелы от пружины. Если раньше наступал контакт верхней плоскости стрелы с верхним ограничителем $У$, выполнялась корректировка значения коэффициента K_1 в формуле (4.4).

После определения начальных условий цикл расчета движения повторялся, причем число таких циклов в программном коде составляло 40000, что позволило провести исследование характера движения системы на временном интервале до 10 с.

При этом программным модулем предусматривался учет непрерывности изменения во времени координаты $x(t)$ за счет прибавления к начальному и конечному отрезкам времени, на которых выполнялось численное решение уравнения (4.4), временного сдвига, обеспечивающего суммирование продолжительности всех вычисленных ранее циклов движения системы.

Рассмотрим характерные формы траекторий, возникающие при различных режимах работы системы (рисунок 4.24) [150].

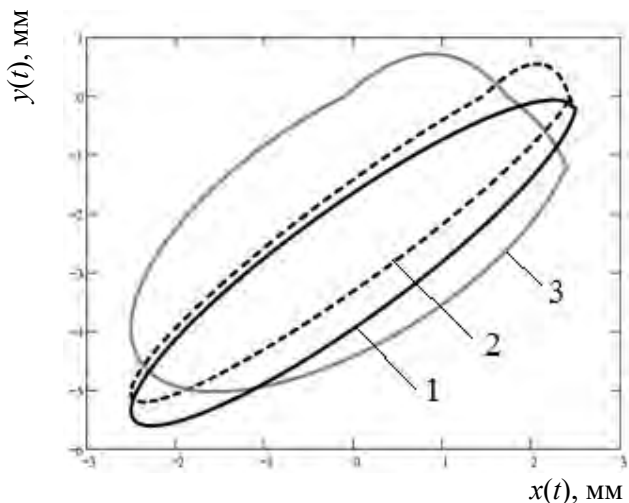


Рис. 4.24. Форма циркуляционной траектории точки рабочего конца стрелы, возникающая на различных этапах работы модели колебательной системы ($m_1 = 200$ г, $x_1 = 50$ мм, $y_1 = 50$ мм, $m_2 = 100$ г, $x_2 = -150$ мм, $y_2 = 0$, $x_c = 100$ мм, $c = 19600$ Н/м, $D = 104$ Па·с): 1 – $f = 1$ Гц (без отрыва от нижнего ограничителя); 2 – 3 Гц (с отрывом от нижнего ограничителя), 3 – 4 Гц (с отрывом от нижнего ограничителя и при контакте с верхним ограничителем)

На рис. 4.24 видно, что увеличение частоты перемещения подвижной платформы (частоты вынужденных колебаний f) приводит к изменению формы траектории движения свободного конца стрелы: с увеличением f возрастает отношение малой и большой осей эллипса q/d . Также с увеличением значения соотношения q/d уменьшается время контакта t_k регулировочного винта с нижним ограничителем (участок траектории, расположенный выше точки с координатой $y(t) = 0$).

В свою очередь уменьшение величины зазора Z с 2 до 1 мм (рисунки 4.25, траектория 2) вызывает изменение траектории отрыва стрелы от нижнего ограничителя (участок траектории, расположенный выше точки с координатой $y(t) = 0$) [150]. Из рисунка 4.25 видно, что при варьировании зазора между верхним ограничителем и плоскостью стрелы изменяется угол λ между осью эллиптической траектории движения точки свободного конца стрелы и осью координат X . Так, с увеличением зазора Z угол λ увеличивается, что

обеспечивает больший поворот длинной оси эллипса по сравнению с траекториями, формируемыми с меньшими значениями зазора. Таким образом, за счет изменения указанного зазора можно эффективно управлять характером взаимодействия распиливаемой заготовки с режущим инструментом, что достигается изменением геометрических размеров и характера наклона сформированной циркуляционной траектории движения заготовки.

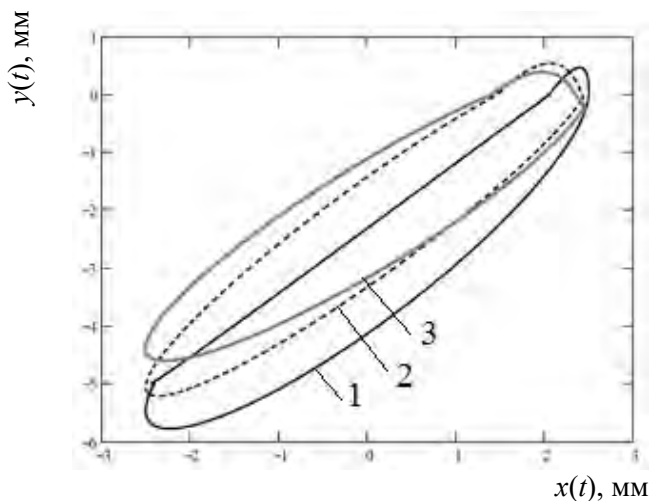


Рис. 4.25. Форма и наклон циркуляционной траектории движения точки рабочего конца стрелы ($m_1 = 200$ г, $x_1 = 50$ мм, $y_1 = 50$ мм, $m_2 = 100$ г, $x_2 = -150$ мм, $y_2 = 0$, $x_c = 100$ мм, $c = 19600$ Н/м, $D = 104$ Па·с, $f = 3$ Гц) при различных величинах зазора между стрелой и верхним ограничителем за один промежуток времени:
1 – $Z = 4$ мм, 2 – 2 мм, 3 – 1 мм

На основании анализа результатов проведенных теоретических исследований установлено, что разработанная колебательная система, обеспечивающая режим двустороннего виброударного взаимодействия стрелы с упругими ограничителями, дает возможность надежно и эффективно управлять параметрами циркуляционного (эллиптического) движения заготовки путем соответствующего регулирования частоты вынужденных колебаний и величины зазора между стрелой и верхним ограничителем. Так, по мере увеличения значений этих параметров возрастает угол λ наклона большой оси

эллиптической траектории движения заготовки к горизонтальной оси и одновременно в сторону увеличения изменяется отношение между малой и большой осями эллипса q/d , что существенно расширяет технологические возможности управления процессом распиливания хрупких неметаллических материалов.

Для подтверждения теоретических положений была проведена серия экспериментов по оценке влияния режимов возбуждения колебательной системы на параметры циркуляционной траектории движения заготовки [151].

Так, в таблице 4.4 приведены параметры эллиптической траектории движения образца, соответствующие различной частоте возбуждения колебательной системы, которые получены при $P_{ст.в} = 6,5$ Н и $Z = 3$ мм.

Таблица 4.4 – Параметры эллиптической траектории движения образца при различной частоте возбуждения колебательной системы

Частота возбуждения колебательной системы, f , Гц	Параметры эллиптической траектории движения заготовки				
	λ , град	d , мм	q , мм	q/d	$T_{ц}$, с
1,7	5	8	2	0,25	0,58
2,8	17	9	3	0,33	0,36
4,0	42	11	5	0,45	0,25

Аналогичным образом на параметры эллиптической траектории движения влияет величина зазора Z , что подтверждается данными, приведенными в таблице 4.5, которые получены при $f = 4$ Гц и $P_{ст.в} = 6,5$ Н.

Из представленных данных (таблица 4.4) видно, что повышение частоты возбуждения колебательной системы сопровождается увеличением угла λ с 5° при $f = 1,7$ Гц до 42° при $f = 4,0$ Гц. Одновременно с этим происходит изменение размеров и формы эллиптической траектории: увеличиваются размеры осей эллипса и при этом возрастает отношение его малой оси к большой q/d . Так, при $f = 1,7$ Гц это отношение составляет 0,25, а при $f = 4,0$ Гц оно увеличи-

вается до 0,45. Помимо этого, с повышением частоты возбуждения колебательной системы уменьшается период циркуляционного движения заготовки $T_{ц}$ с 0,58 с при $f = 1,7$ Гц до 0,25 с при $f = 4,0$ Гц, а соответственно возрастает количество соударений заготовки с торцевой поверхностью диска за время ее распиливания, что приводит к более интенсивному разрушению ее материала в единицу времени, т.е. к повышению интенсивности протекания процесса распиливания.

Таблица 4.5 – Параметры эллиптической траектории движения образца при различной величине зазора между стрелой и верхним ограничителем

Величина зазора Z , мм	Параметры эллиптической траектории движения заготовки			
	λ , град	d , мм	q , мм	q/d
0	12	8	2	0,25
1	20	9	3	0,33
2	34	10	4	0,4
3	42	11	5	0,45
4	51	12	6	0,5

Из данных таблицы 4.5 видно, что с увеличением Z от нуля до 4 мм значение угла λ возрастает с 12° до 51° , а отношение q/d с 0,25 до 0,5 при одновременном увеличении размера осей эллипса.

Влияние величины статического усилия прижатия опорного винта стрелы к нижнему ограничителю на изменение параметров эллиптической траектории отражают данные, приведенные в таблице 4.6, которые получены при $f = 4$ Гц и $Z = 3$ мм.

Из результатов таблицы 4.6 видно, что с увеличением $P_{ст.в}$ от 1,2 до 6,5 Н значение угла λ возрастает с 9° до 42° , а также увеличиваются размеры осей эллипса и отношение q/d с 0,29 до 0,45. Здесь следует отметить специфическую особенность обеспечения заданной величины $P_{ст.в}$ при распиливании с использованием гравитационной подачи, которая влияет на режим работы колебательной системы, а соответственно на параметры траектории движения заготовки. Изменение статического усилия ее прижатия к торцевой

поверхности диска обеспечивается путем изменения углового положения рычага с противовесом на стреле относительно горизонтали (угол γ на рисунке 4.1). С уменьшением угла γ значение $P_{\text{ст.в}}$ падает, но при этом в результате уменьшения расстояния h (плечо действия инерционных сил относительно оси качания стрелы) снижается величина действующего на стрелу динамического момента, что сопровождается падением величины смещений заготовки в вертикальном направлении.

Таблица 4.6 – Параметры эллиптической траектории движения образца при различном значении статического усилия его прижатия к торцевой поверхности диска

Величина статического усилия $P_{\text{ст.в}}$, Н	Параметры эллиптической траектории движения заготовки			
	λ , град	d , мм	q , мм	q/d
1,2	9	7	2	0,29
2,8	28	9	3	0,33
5,0	33	10	4	0,4
6,5	42	11	5	0,45

Таким образом, исходя из обобщенного анализа полученных экспериментальных данных, можно сделать принципиально важный вывод о том, что в условиях виброударного функционирования колебательной системы все варьируемые параметры режима распиливания (f , Z и $P_{\text{ст.в}}$) одинаковым образом влияют на изменение положения и формы эллиптической траектории движения образца, в частности с их повышением увеличиваются угол λ , размеры осей эллипса, а также их отношение q/d .

4.2.2. Влияние параметров циркуляционного движения заготовки на кинематику и динамику ее взаимодействия с распиловочным диском

Очевидно, в сравнении с традиционными условиями распиливания сообщение заготовке циркуляционного движения приводит к изменению кинематики и динамики взаимодействия последней с

распиловочным диском. Оно характеризуется: во-первых, периодическим косым соударением заготовки с торцевой (режущей) кромкой диска; во-вторых, дополнительным относительным скольжением боковых поверхностей диска с пропиленными участками заготовки. Степень проявления этих особенностей контактного взаимодействия определяется параметрами эллиптической траектории движения заготовки, что схематично иллюстрируется на рисунке 4.26 [144, 152].

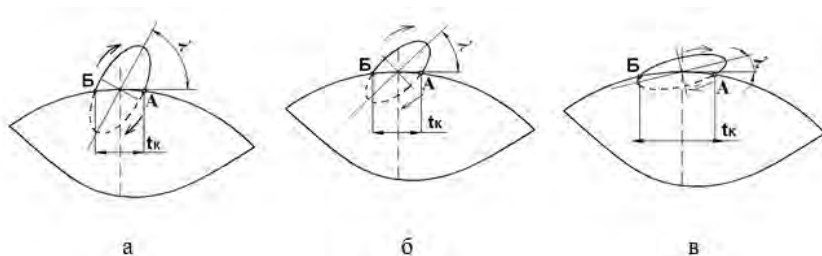


Рис. 4.26. Схема взаимодействия заготовки с диском при различных параметрах ее движения по эллиптической траектории:
 а – $\lambda = 40^\circ$, б – 30° , в – 20°

При максимальном значении угла λ (рисунок 4.26а), которому соответствует наибольшее отношение полуосей q/d эллипса, имеет место наиболее интенсивное ударное взаимодействие заготовки с режущей кромкой распиловочного диска, что обусловлено значительной величиной нормальной составляющей P_d^H силы их соударения. В этом случае продолжительность их контактного взаимодействия t_k определяется участком АБ траектории движения заготовки. По мере уменьшения угла λ (рисунки 4.26б и 4.26в), а соответственно и отношения q/d интенсивность ударного взаимодействия рассматриваемых поверхностей в силу снижения величины P_d^H падает, но одновременно происходит увеличение продолжительности действия фрикционной стадии за время контактирования t_k (участок АБ) в течение периода циркуляционного движения заготовки $T_{ц}$.

Таким образом, процесс контактного взаимодействия заготовки с режущей кромкой распиловочного диска характеризуется последовательным протеканием следующих стадий: стадии соударения,

началу которой соответствует точка А траектории движения заготовки (рисунок 4.26), стадии их относительного скольжения (фрикционная стадия), окончанию которой соответствует точка Б, и стадии отрыва поверхностей, которая продолжается до наступления очередной стадии их соударения. При этом путем изменения параметров траектории движения заготовки, что обеспечивается варьированием режимов возбуждения колебательной системы, можно целенаправленно влиять на интенсивность протекания как ударной, так и фрикционной стадий взаимодействия последней с режущей кромкой диска, а соответственно на условия протекания процесса разрушения обрабатываемого материала.

Взаимодействие боковых поверхностей распиловочного диска с пропиленными участками заготовки, совершающей циркуляционное движение, характеризуется изменением как направления, так и величины вектора относительной скорости их движения $V_{от}$ (рисунок 4.27).

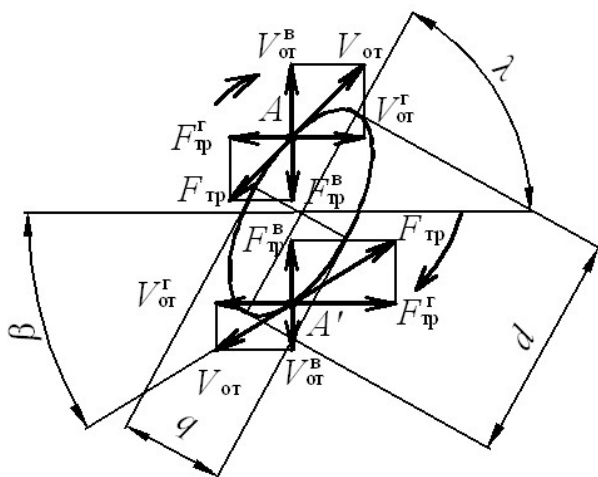


Рис. 4.27. Изменение скорости относительного скольжения точки, совершающей движение по эллиптической траектории, и сил трения при контактировании с боковой поверхностью диска

Соответственно изменяются направление и величина сил трения $F_{тр}$, действующих по площадкам контакта взаимодействующих по-

верхностей, а следовательно, и условия изнашивания последней. В частности, наличие вертикальной составляющей силы трения $F_{\text{тр}}^B$ создает благоприятные условия для обеспечения условия неповторяемости следов обработки на распиленной поверхности заготовки, что должно способствовать снижению ее шероховатости по сравнению с обработкой по традиционной технологии. Очевидно, что при прочих равных условиях степень снижения шероховатости зависит от величины $F_{\text{тр}}^B$, которая возрастает с увеличением угла λ и большой оси d эллиптической траектории движения заготовки. Кроме того, наличие такого движения влияет на изменение пути относительного скольжения пропиленных участков заготовки с боковыми поверхностями распиловочного диска, а соответственно на значение работы действующих между ними сил трения, что также влияет на качество обработанных поверхностей.

Следовательно, в основу теоретической оценки степени влияния параметров эллиптического движения заготовки на повышение качества ее распиленных поверхностей оправдано положить расчет сил трения, возникающих в результате действия вертикальной составляющей скорости относительного скольжения контактирующих поверхностей, а также расчет пути их относительного перемещения за время выполнения операции.

Таким образом, выявленные особенности кинематики движения боковых поверхностей распиловочного диска с пропиленными участками заготовки, заключающиеся в периодическом изменении направления и величины вектора скорости их относительного скольжения, а соответственно и действующих между ними сил трения, позволяют обоснованно прогнозировать снижение по сравнению с обработкой в обычных условиях шероховатости поверхности площадок распиленных полуфабрикатов.

4.2.3. Теоретическая оценка влияния циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания

Как известно [153], в основе процесса механического распиливания хрупких неметаллических материалов лежит механизм их хрупкого разрушения, который сопровождается образованием на обрабатываемой поверхности сети микротрещин, формирующих на

ней так называемый предразрушенный слой, с последующим скалыванием частиц материала в результате повторного воздействия на него абразивных (алмазных) зерен, находящихся в зоне обработки. С увеличением глубины этого слоя и степени его повреждения возрастает количество удаляемого в единицу времени материала, что обуславливает повышение интенсивности процесса его распиливания. Важно отметить, что доминирующее влияние на указанные параметры состояния обрабатываемой поверхности оказывает усилие ее прижима к режущей кромке инструмента $P_{ст}$, с повышением которого их значения возрастают. Отсюда следует, что в основу теоретической оценки влияния циркуляционного движения заготовки на интенсивность распиливания оправдано положить расчет импульса ударной силы, действующего за время ударно-фрикционного взаимодействия заготовки с торцевой поверхностью распиловочного диска.

Для определения этого параметра воспользуемся следующими допущениями. Всю массу системы m сосредоточим в одной точке,двигающейся по эллиптической траектории, с длиной большой оси, равной d , и длиной малой оси q . По аналогии с работой [19] торцевую поверхность распиловочного диска представим в виде плоского полотна, расположив на нем центр координат, как показано на рисунке 4.28.

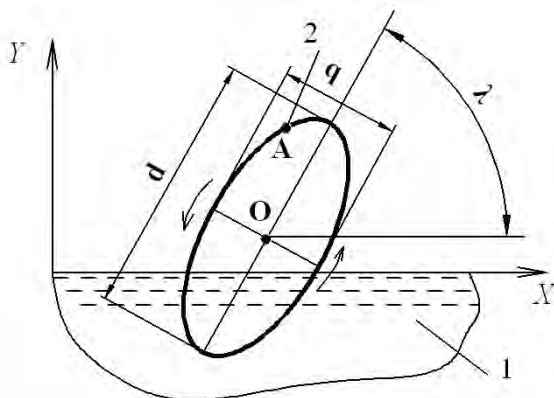


Рис. 4.28. Схема к расчету импульса ударной силы:
1 – режущее полотно (аналог распиловочного диска); 2 – траектория эллиптического движения точки A

Если большая ось эллипса d совпадает с осью абсцисс, то изменение координат движения материальной точки A по эллиптической траектории в течение времени t будет выражаться как [154]:

$$\begin{cases} x(t) = d \cos \varphi(t) + x_0; \\ y(t) = q \sin \varphi(t) + y_0, \end{cases} \quad (4.12)$$

где d – большая ось эллипса;

q – малая ось эллипса;

$\varphi(t)$ – угол поворота радиуса-вектора каждой точки траектории эллиптического движения за период времени t ;

x_0, y_0 – координаты центра эллиптической траектории.

В случае наклона эллиптической траектории движения точки под углом λ к поверхности режущего инструмента система (4.12) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} x(t) = d \cos \varphi(t) \cos \lambda - q \sin \varphi(t) \sin \lambda + x_0; \\ y(t) = d \cos \varphi(t) \sin \lambda + q \sin \varphi(t) \cos \lambda + y_0. \end{cases} \quad (4.13)$$

Проекции на оси X и Y скорости точки A при ее движении по эллиптической траектории будут равны:

$$\begin{cases} v_x = x'(t) = -d \sin \varphi(t) \cos \lambda - q \cos \varphi(t) \sin \lambda; \\ v_y = y'(t) = -d \sin \varphi(t) \sin \lambda + q \cos \varphi(t) \cos \lambda. \end{cases} \quad (4.14)$$

где v_x и v_y – проекции вектора скорости точки A на оси X и Y соответственно.

Тогда полная скорость v точки будет выражаться как

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{q^2 \cos^2 \varphi(t) + d^2 - d^2 \cos^2 \varphi(t)}. \quad (4.15)$$

Угол наклона скорости v точки A к оси X (угол падения материальной точки на торцевую поверхность режущего инструмента при

их косом соударении), представленный на рисунке 4.28, будет вычисляться как

$$\beta = \frac{v_x}{v} = \frac{-d \sin \varphi(t) \cos \lambda - q \cos \varphi(t) \sin \lambda}{\sqrt{q^2 \cos^2 \varphi(t) + d^2 - d^2 \cos^2 \varphi(t)}}. \quad (4.16)$$

Согласно [155] полный импульс ударной силы можно выразить

$$I_{ц} = mV(1 + K_B) \cos \beta \sqrt{1 + f_{тр}^2} = m \sqrt{q^2 \cos^2 \varphi(t) + d^2 - d^2 \cos^2 \varphi(t)} \times \\ \times (1 + K_B) \cos \left(\frac{-d \sin \varphi(t) \cos \lambda - q \cos \varphi(t) \sin \lambda}{\sqrt{q^2 \cos^2 \varphi(t) + d^2 - d^2 \cos^2 \varphi(t)}} \right) \sqrt{1 + f_{тр}^2}, \quad (4.17)$$

где $I_{ц}$ – полный импульс ударной силы;

m – масса системы;

K_B – коэффициент упругого восстановления скорости при ударе;

$f_{тр}$ – коэффициент трения скольжения распиловочного диска о поверхность материала заготовки.

На рисунке 4.29 приведена рассчитанная по формуле (4.17) зависимость полного импульса ударной силы для каждой точки эллиптической траектории при различных значениях угла λ ее наклона к торцевой поверхности режущего инструмента (к оси X) [154].

Как видно, импульс ударной силы изменяется по закону косинуса, при этом увеличение угла наклона эллиптической траектории λ с 0 до 60° вызывает двукратное увеличение амплитуды этого изменения, а также сдвиг фазы такого изменения. Вместе с тем, чем больше угол λ наклона такой траектории, тем меньший ее участок контактирует с режущей поверхностью инструмента (рисунок 4.29), т.е. тем меньше продолжительность фрикционной стадии взаимодействия заготовки с диском.

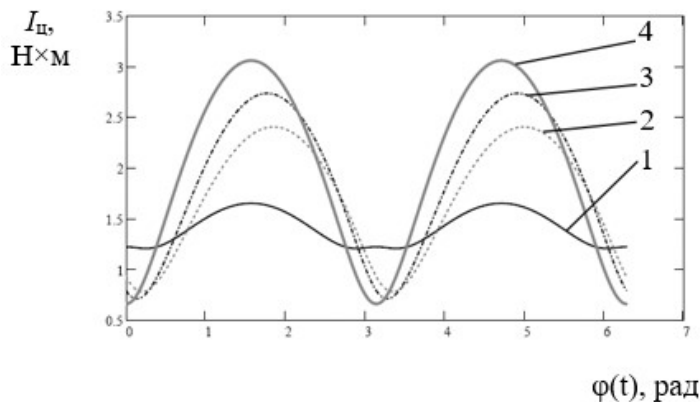


Рис. 4.29. Зависимость изменения полного импульса ударной силы от угла поворота радиуса-вектора ($d = 40$ мм, $q = 16$ мм, $m = 0,05$ кг, $K_b = 0,8$, $f_{тр} = 0,25$) при различных углах наклона эллиптической траектории:
 1 $-\lambda = 0^\circ$; 2 $-\lambda = 30^\circ$; 3 $-\lambda = 45^\circ$; 4 $-\lambda = 60^\circ$

В этой связи важно оценить суммарный полный импульс ударной силы для каждой точки эллиптической траектории ($I_{эл}$), в которой обрабатываемая заготовка находится в контакте с режущим инструментом. Затем сравним полученное значение с импульсом $I_{ст}$, сообщаемым заготовке под действием только гравитационной подачи, т.е. при традиционном распиливании. Это позволит количественно оценить степень влияния параметров циркуляционного движения заготовки на изменение интенсивности ее распиливания. Значение импульса силы при распиливании в обычных условиях за время, соответствующее периоду циркуляционного движения заготовки, определим по формуле

$$I_{ст} = P_{ст} T_{ц} = mg T_{ц} = mgN, \quad (4.18)$$

где $I_{ст}$ – импульс силы при распиливании в обычных условиях под действием только гравитационной подачи;

$P_{ст}$ – сила прижатия заготовки к диску под действием только гравитационной подачи;

$T_{ц}$ – период циркуляционного движения;

g – ускорение свободного падения;

N – количество циклов итераций за период циркуляционного движения;

$N = 3600$.

Для оценки интервала итераций, при которых происходит взаимодействие движущейся по эллиптической траектории заготовки с режущим инструментом, выполнялось вычисление начала $i_{\text{нач}}$ и конца $i_{\text{кон}}$ интервала, определяемых с помощью следующих условий:

$$\begin{aligned} i_{\text{нач}} &= i, \text{ если } y_i \leq 0 \text{ и } y_{i-1} > 0; \\ i_{\text{кон}} &= i, \text{ если } y_{i-1} < 0 \text{ и } y_i \geq 0, \end{aligned} \quad (4.19)$$

где y_{i-1}, y_i – элементы вектора вертикальных координат у каждой точки эллиптической траектории.

Тогда суммарный полный импульс ударной силы для каждой точки эллиптической траектории, в которой обрабатываемая заготовка находится в контакте с режущим инструментом, будет вычисляться по формуле

$$I_{\text{эл}} = \sum_{i_{\text{нач}}}^{i_{\text{кон}}} I_{\text{ц}i}, \quad (4.20)$$

где $I_{\text{эл}}$ – суммарный полный импульс ударной силы;

$I_{\text{ц}i}$ – полный импульс ударной силы в каждой точке эллиптической траектории при ее контакте с режущим инструментом, вычисляемый по формуле (4.17).

На рисунке 4.30 приведена зависимость отношения $I_{\text{эл}}/I_{\text{ст}}$ для различных углов λ наклона эллиптической траектории при различном соотношении q/d [154].

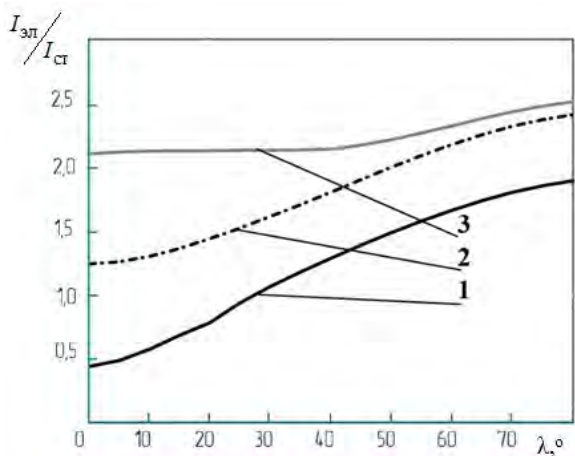


Рис. 4.30. Зависимость изменения отношения $I_{эл}/I_{ст}$ от угла λ наклона эллиптической траектории при различных соотношениях малой и большой осей эллипса: 1 – $q/d = 0,1$; 2 – $0,3$; 3 – $0,5$

Из полученных данных следует, что параметры эллиптической траектории движения заготовки существенным образом влияют на значение отношения $I_{эл}/I_{ст}$. Так, при $q/d < 0,1$ с изменением угла λ в диапазоне от 0 до 30° отношение $I_{эл}/I_{ст}$ оказывается меньше единицы. Связано это с тем, что в рассмотренном случае траектория движения заготовки представляет собой практически прямую линию, которая при $\lambda = 0$ параллельна горизонтальной оси. В результате взаимодействие заготовки с диском протекает в безударном режиме и характеризуется меньшим в сравнении с $I_{ст}$ значением $I_{эл}$. По мере увеличения угла λ интенсивность их ударно-фрикционного взаимодействия возрастает, и при $\lambda > 30^\circ$ значение $I_{эл}$ становится больше $I_{ст}$. Дальнейшее увеличение угла λ сопровождается увеличением отношения $I_{эл}/I_{ст}$. В случаях, когда $q/d = 0,1$ и $0,5$, т.е. когда траектория движения заготовки имеет выраженную эллиптическую форму, при всех значениях угла λ отношение $I_{эл}/I_{ст}$ оказывается больше единицы. При этом с увеличением q/d и угла λ оно возрастает, что должно положительно отразиться на повышении интенсивности распиливания заготовки. Отсюда следует, что для обеспечения высокой интенсивности необходимо использовать такие режимы воз-

буждения колебательной системы, которые позволяют сформировать эллиптическую траекторию движения заготовки, имеющую наибольшее значение угла λ .

Для подтверждения результатов теоретических исследований с помощью методики, изложенной в разделе 4.1.3.3, были экспериментально определены значения импульса нормальной составляющей силы соударения заготовки $I_{ц}^B$, совершающей эллиптическое движение, с упругой балкой (аналог отрезного диска) при различных условиях и режимах возбуждения колебательной системы созданной распиловочной секции. Влияние величины зазора Z между стрелой и верхним ограничителем на отношение импульса нормальной составляющей силы соударения $I_{ц}^B$ к статическому значению импульса $I_{ст}$ отражают зависимости, представленные на рисунке 4.31.

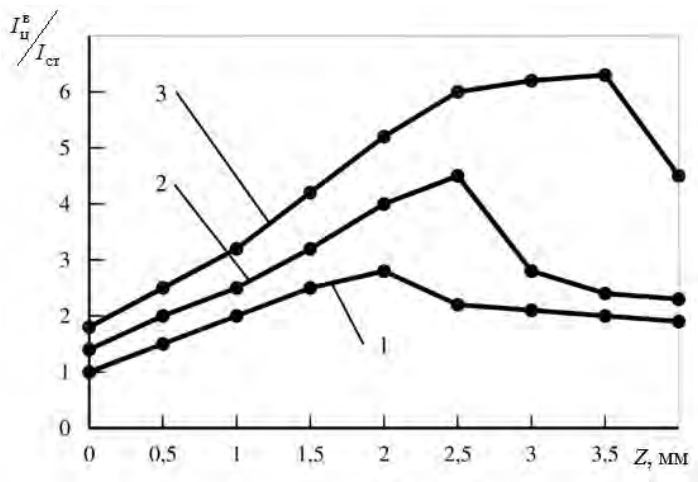


Рис. 4.31. Экспериментальная зависимость $I_{ц}^B / I_{ст}$ от величины зазора Z при различной частоте возбуждения f колебательной системы ($P_{ст} = 1,7$ Н)
1 – $f = 1,7$ Гц; 2 – 2,8 Гц, 3 – 4 Гц

Их анализ показывает, что при исследованных частотах возбуждения колебательной системы по мере увеличения зазора от его ну-

левого значения отношение $I_{ц}^B / I_{ст}$ практически линейно возрастает, достигая при определенной для данной частоты возбуждения величины зазора своего максимального значения, после чего отношение $I_{ц}^B / I_{ст}$ резко снижается. При этом с уменьшением частоты возбуждения колебательной системы величина этого критического зазора смещается в сторону меньших его значений и одновременно снижается отношение $I_{ц}^B / I_{ст}$. Объясняется это тем, что с превышением величины критического зазора двусторонний режим виброударного взаимодействия стрелы с ограничителями сменяется режимом ее одностороннего виброударного взаимодействия только с нижним ограничителем, в результате чего значение $I_{ц}^B / I_{ст}$ снижается.

Таким образом, учитывая изложенные в работе [14] особенности механизма разрушения материала, заключающиеся в прямой зависимости интенсивности процесса распиливания от величины прижатия режущего инструмента к дну пропила заготовки, введение в конструкцию распиловочной секции верхнего ограничителя предоставляет возможность дополнительного управления процессом разрушения материала заготовки путем регулирования наклоном и размерами формируемой циркуляционной траектории. Это в свою очередь определяет величину суммарного импульса ударной силы при контакте заготовки с режущей кромкой диска, а соответственно изменяет интенсивность протекания процесса распиливания.

4.2.4. Теоретико-экспериментальные исследования влияния циркуляционного движения заготовки на повышение качества обработанной поверхности

Как было показано в разделе 4.2.2, положительное влияние циркуляционного движения заготовки на качество обработанных поверхностей связано с изменением по сравнению с традиционным распиливанием условий фрикционного взаимодействия пропиленных на ней участков с боковыми поверхностями распиловочного

диска, что обусловлено особенностями кинематики их относительного скольжения. С учетом этого показано, что в основу теоретической оценки степени влияния циркуляционного движения заготовки на качество обработанных поверхностей оправдано положить определение двух параметров: изменения пути скольжения заготовки относительно диска за время ее распиливания и изменения траектории движения пропиленных участков заготовки относительно боковых поверхностей диска.

4.2.4.1. Теоретическая оценка влияния циркуляционного движения заготовки на величину пути ее скольжения относительно диска за время распиливания

Для выполнения соответствующих расчетов в первую очередь необходимо получить зависимость, описывающую движение точки на поверхности заготовки. Для этого обратимся к схеме распиливания, приведенной на рисунке 4.32 [156, 157].

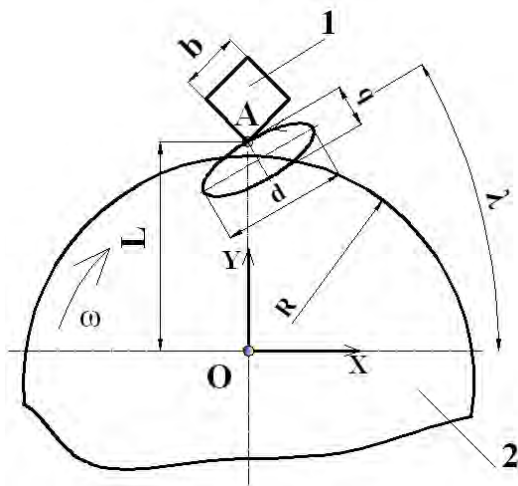


Рис. 4.32. Схема для математического описания движения точки на поверхности заготовки, совершающей эллиптическое движение относительно распиловочного диска:

1 – обрабатываемый кристалл; 2 – распиловочный диск

В данном случае торцевая поверхность диска 2 моделируется окружностью с центром в точке O с координатами $(0, 0)$ и радиусом $R = 38$ мм, а обрабатываемую заготовку 1 представим в виде квадрата. При этом ближайшая к режущему инструменту точка A заготовки диска находится на расстоянии $L = 40$ мм от центра диска вдоль оси Y . В случае сообщения заготовке циркуляционного движения каждая ее точка, включая A , перемещается по эллиптической траектории с размерами ее большой и малой осей соответственно d и q .

Для упрощения задачи оценим путь скольжения не для всех точек заготовки, а только точки A (рисунок 4.32), как первой начинающей взаимодействие с боковой поверхностью инструмента [156]. При традиционном распиливании данная величина будет определяться из уравнения

$$L(t) = \omega t(R - S) = \omega Rt - \frac{b\sqrt{2}}{t}t, \quad (4.21)$$

где $L(t)$ – путь скольжения точки A заготовки;

ω – частота вращения диска, мин⁻¹;

R – радиус распиловочного диска;

b – длина стороны заготовки;

$S_{\text{рад}}$ – радиальная подача заготовки на распиловочный диск, мм/мин;

t – время распиливания заготовки, с.

В случае придания заготовке циркуляционного движения сообщим точке A движение по эллиптической траектории с параметрами d и q , наклоненной по углом λ к оси OX (рисунок 4.32).

Для вычисления координат точки A при ее движении по эллиптической траектории применялась программная среда MathCAD. В ней сначала задавались координаты эллиптического движения согласно уравнениям:

$$\begin{cases} x_j = d \cos(j \frac{\pi}{180}) + x_0; \\ y_j = q \sin(j \frac{\pi}{180}) + y_0, \end{cases} \quad (4.22)$$

где x_0, y_0 – координаты начального положения точки A , совпадающие в центром эллиптической траектории и определяемые как $x_0 = 0, y_0 = R$;

$j =$ от 0° до 360° – текущий угол наклона радиус-вектора в градусах.

Вычисленные по формулам координаты сохранялись в векторах X и Y .

Одновременно вычисляли угол β_j наклона касательной к эллипсу в каждой точке с координатами x_j и y_j (формула 4.22), который также являлся углом наклона к оси OX скорости движения точки по данной траектории и углом падения:

$$\beta_j = \begin{cases} \arctg(\frac{x_j q^2}{y_j d^2}), \text{ если } y_j \neq 0; \\ 90^\circ, \text{ если } y_j = 0 \text{ и } j = 0; \\ -90^\circ, \text{ если } y_j = 0 \text{ и } j \neq 0. \end{cases} \quad (4.23)$$

Для переноса траектории векторы X и Y перемножались на матрицу M_1 направляющих косинусов, вычисляемую как:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & +\frac{q}{2} \end{pmatrix}. \quad (4.24)$$

Для поворота траектории на угол λ полученные значения векторов X и Y перемножали на матрицу M_2 направляющих косинусов, вычисляемую как:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda \\ -\sin \lambda & \cos \lambda \end{pmatrix}. \quad (4.25)$$

Полученные после перемножения значения векторов X и Y соединялись в среде MathCAD вместе в одну матрицу *Resh*. Координаты x'_j и y'_j полученных из координат x_j и y_j (формула 4.22) после перемножения на матрицы M_1 и M_2 заносились соответственно в первый и второй столбец матрицы. В третий столбец матрицы *Resh* вносилось значение угла β'_j в градусах наклона касательной к повернутому эллипсу в соответствии с формулой

$$\beta'_j = \beta_j + \lambda. \quad (4.26)$$

Полученная траектория движения точки A заготовки [156] относительно неподвижного распиловочного диска представлена на рисунке 4.33а (для упрощения рисунка условно принято, что распиливание заготовки выполняется за время пяти ее циркуляционных движений, нижняя часть распиловочного диска не показана).

В случае распиливания заготовка опускается к центру распиловочного диска и одновременно при этом совершает циркуляционное движение. Результирующая траектория движения точки A заготовки относительно распиловочного диска приведена на рисунке 4.33б. Для учета такого движения из каждой координаты Y (второй столбец матрицы *Resh*) вычиталась поправка Δ_j вычисляемая по формуле:

$$\Delta_j = R - \frac{b_j \sqrt{2}}{360tf}, \quad (4.27)$$

где Δ_j – поправка;

f – частота движения точки по циркуляционной траектории (в расчета принималась равной 5 Гц).

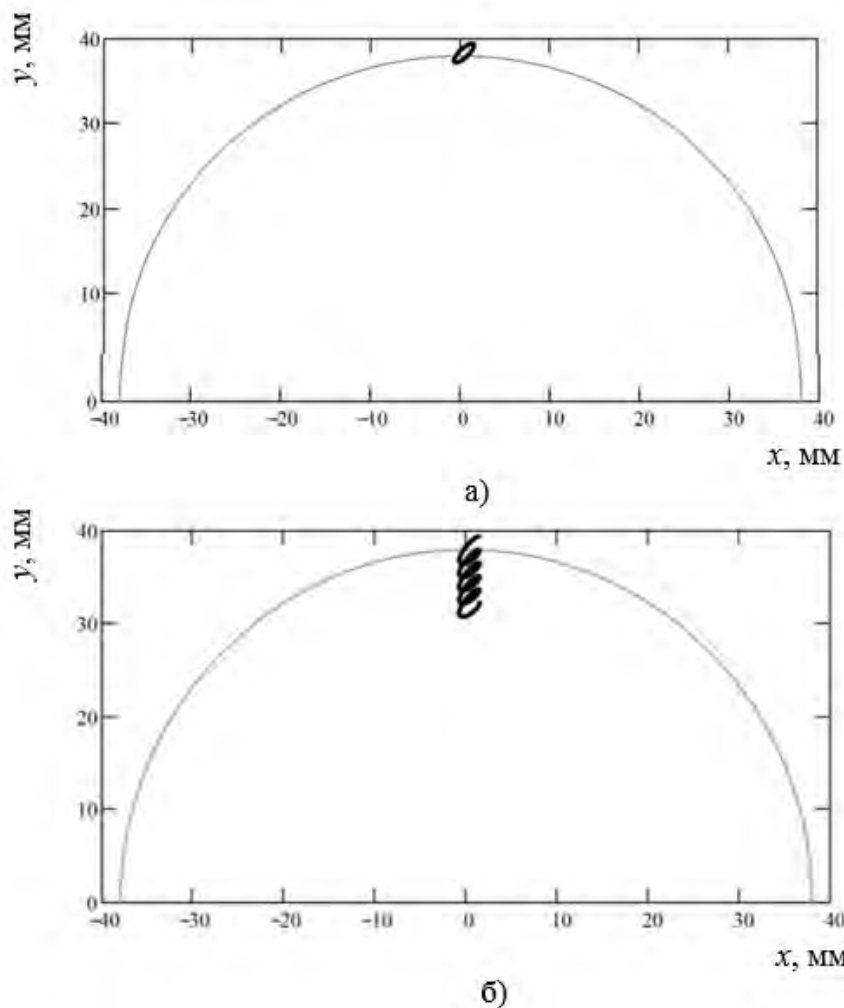


Рис. 4.33. Расположение циркуляционной траектории движения точки А заготовки относительно диска: а – при отсутствии распиливания заготовки; б – в случае ее распиливания

Использование такой поправки позволило учесть перемещение заготовки к центру режущего инструмента при условии, что полное распиливание осуществится за время $t = 300$ с.

В результате расчета получена матрица, содержащая координаты перемещения в пространстве точки A за время ее полного распиливания. При этом необходимо учесть, что часть времени заготовка не взаимодействует в режущим инструментом. Так, на рисунке 4.33а это участки циркуляционной траектории лежащие вне круга. Поэтому из полученной матрицы $Resh$ удалялись все строки, на которых не выполнялось условие:

$$x_j^2 + y_j^2 \leq R^2. \quad (4.28)$$

После такой обработки определяли величину скорости перемещения точки A по циркуляционной траектории на каждом ее участке в соответствии с формулой

$$v_j = \frac{\sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2}}{\Delta t}, \quad (4.29)$$

где Δt – время прохождения точки в течение одной итерации,

$$\Delta t = \frac{1}{360f}. \quad (4.30)$$

Одновременно на каждом участке результирующего движения точки A определяли линейную скорость вращения $v_{кр}$ распиловочного диска и угол γ ее наклона к оси OX . Для этого использовали следующие формулы:

$$\gamma_j = 90^\circ - \arctg\left(\frac{y'_j}{x'_j}\right); \quad (4.31)$$

$$v_{крj} = \omega \sqrt{x_j'^2 + y_j'^2}. \quad (4.32)$$

Результирующая относительная скорость определялась как

$$\bar{v}_{\text{отн}} = \bar{v}_{\text{кр}} + \bar{v}, \quad (4.33)$$

или в скалярной форме для каждого участка заготовки

$$v_{\text{отн}j} = \sqrt{v_j^2 + v_{\text{кр}j}^2 + 2v_j v_{\text{кр}j} \cos(\beta_j + \gamma_j)}. \quad (4.34)$$

Получаем формулу для расчета пути скольжения точки A заготовки при распиливании с циркуляционным движением заготовки

$$L(t) = \sum_{t=0}^{t=\Delta t \cdot j} v_{\text{отн}j} \cdot \Delta t. \quad (4.35)$$

На рисунке 4.34 приведено изменение длины пути скольжения точки A заготовки по боковой поверхности диска [156].

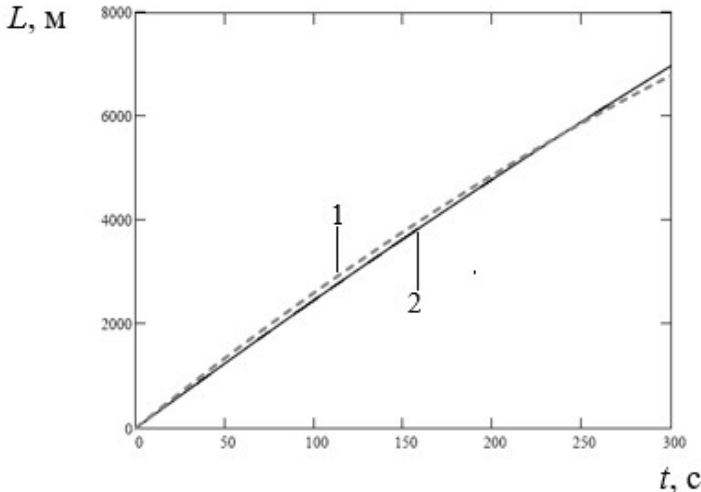


Рис. 4.34. Зависимость пути скольжения точки заготовки за время ее распиливания: 1 – при распиливании в обычных условиях; 2 – при сообщении заготовке движения по эллиптической траектории ($\lambda = 45^\circ$, $d = 10$ мм, $q = 3$ мм, $f = 3$ Гц)

Как видно, в случае сообщения заготовке циркуляционного движения (сплошная линия) длина пути на первых двух третях времени

обработки оказывается несколько меньше длины пути при традиционном распиливании, что вызвано отрывом заготовки от режущего инструмента в начале процесса распиливания. Затем при его окончании длина пути скольжения в случае циркуляционного движения заготовки становится несколько больше, чем при традиционном распиливании. Незначительное различие между данными показателями связано с тем, что частота циркуляционного движения заготовки значительно меньше частоты вращения распиловочного диска.

Следовательно, изменение пути относительного скольжения пропиленных участков заготовки, совершающей движение по эллиптической траектории, с боковыми поверхностями распиловочного диска не может оказывать ощутимого влияния на условие формирования ее обработанных поверхностей.

Поэтому далее проанализируем влияние циркуляционного движения заготовки на условия контактного взаимодействия ее пропиленных участков с боковыми поверхностями диска и установим роль вертикальной составляющей этого движения в процессе формирования шероховатости распиленной поверхности. Для решения этих задач необходимо получить зависимость, описывающую траекторию перемещения точки, принадлежащей заготовке, на боковой поверхности диска.

4.2.4.2. Математическое и физическое моделирование траектории перемещения точки, принадлежащей заготовке, на боковой поверхности диска

Для определения траектории, оставляемой точкой на боковой поверхности диска (для упрощения расчетов разместим ее в центре заготовки), составим уравнение координат точек окружности, моделирующей торцевую поверхность распиловочного диска

$$\begin{cases} x_i = R \cos(a_i) + X_0; \\ y_i = R \sin(a_i) + Y_0, \end{cases} \quad (4.36)$$

где x_i, y_i – координаты точки окружности;

X_0, Y_0 – координаты центра окружности;

$R = 38$ мм – радиус окружности;

α_i – угол между радиусом-вектором, проведенным к точке с координатами x_i, y_i и положительным направлением оси OY .

В расчетах количество i точек принималось равным 36000. Перемещение заготовки по эллиптической траектории с размерами большой и малой полуосей, равными соответственно d и q , с центром в начале координат, можно представить в виде точек, координаты которых выражаются как:

$$\begin{cases} x_j = d \cos \eta_j; \\ y_j = q \sin \eta_j, \end{cases} \quad (4.37)$$

где η_i – угол между радиус вектором, проведенным к j -той точке на эллиптической траектории с координатами x'_j, y'_j и положительным направлением оси OY , в расчетах j принимало значения от 0 до 360.

В случае наклона эллиптической траектории движения точки под углом λ к положительному направлению оси OX система преобразуется к виду

$$\begin{cases} x_j = d \cos \eta_j \cos \lambda - q \sin \eta_j \sin \lambda \\ y_j = d \cos \eta_j \sin \lambda + q \sin \eta_j \cos \lambda \end{cases} \quad (4.38)$$

Если оставить заготовку неподвижной, то можно заменить движение заготовки по эллиптической траектории движением центра круга по этой же траектории, т.е. координаты точек фигуры получаемой при данной операции будут выражаться как:

$$\begin{cases} x_i = R \cos(\alpha_i) + d \cos \eta_j \cos \lambda - q \sin \eta_j \sin \lambda; \\ y_j = R \sin(\alpha_i) + d \cos \eta_j \sin \lambda + q \sin \eta_j \cos \lambda. \end{cases} \quad (4.39)$$

В случае, если приравнять индексы $i = j$, формируется траектория движения заготовки при равенстве частот вращения диска и заготовки, вид траектории отображен на рисунке 4.35.

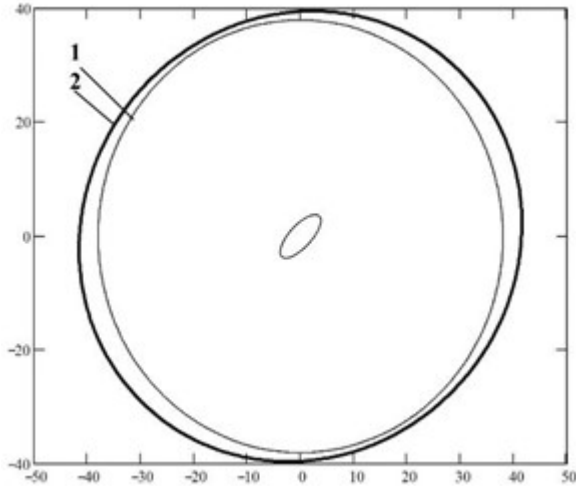


Рис. 4.35. Форма траектории перемещения точки, принадлежащей заготовке относительно боковых поверхностей распиловочного диска:

1 – окружность, моделирующая режущий инструмент, а также эллиптическая траектория ($\lambda = 45^\circ$) перемещения его центра, соответствующая циркуляционному движению заготовки; 2 – результирующая траектория перемещения, описываемая уравнениями (4.39)

Чтобы определить форму траектории при других соотношениях частот вращения режущего инструмента и перемещения заготовки по циркуляционной траектории, свяжем индексы i и j друг с другом путем ввода искусственного индекса χ , принимающего целочисленные значения в диапазоне от 0° до 360° :

$$\begin{cases} i = S_1 \chi; \\ j = S_2 \chi, \end{cases} \quad (4.40)$$

где отношение безразмерных коэффициентов $S_1/S_2 = n_d / n_3$ представляет собой отношение простых целых чисел, эквивалентное отношению частот вращения диска n_d и заготовки n_3 .

Так, формы траекторий, формируемых при различных значениях S_1 и S_2 , приведены на рисунке 4.36.

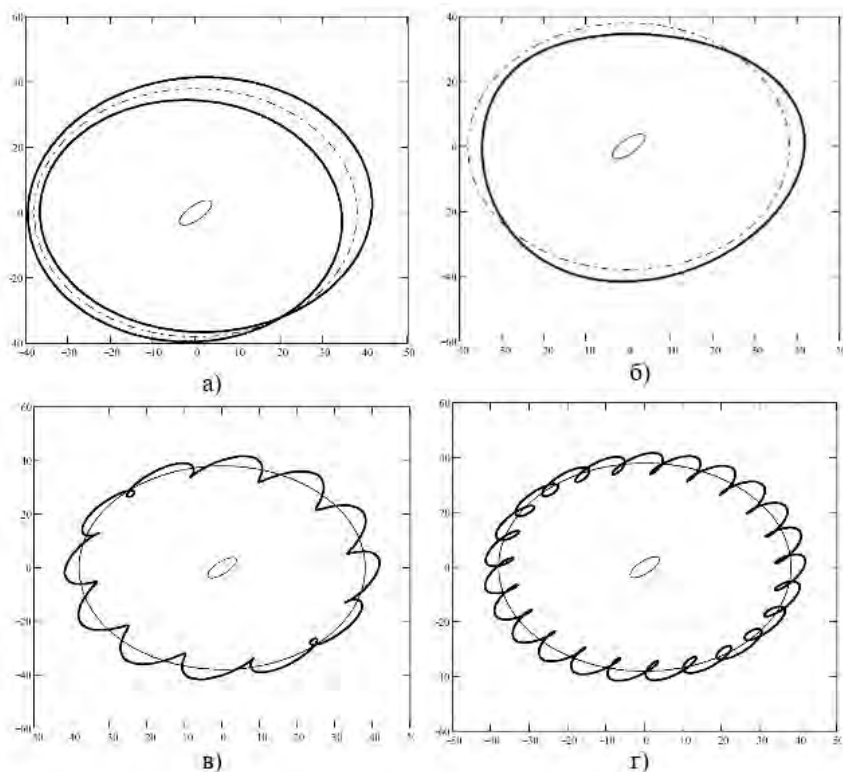


Рис. 4.36. Формы траектории точки, принадлежащей заготовке, оставляемой на боковой поверхности диска для различных соотношений частоты вращения инструмента и частоты перемещения заготовки по эллиптической траектории: а – $n_d / n_z = 2,000$; б – $0,500$; в – $0,077$; г – $0,042$

Таким образом, предложена математическая модель, позволяющая определить форму траектории, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке, на боковой поверхности диска при различных соотношениях частот вращения инструмента и перемещения заготовки по циркуляционной траектории, а также для различных ее геометрических параметров (размера малой и большой полуосей, угла наклона последней к горизонтали).

Для наглядности протекания процесса взаимодействия этих поверхностей и анализа влияющих на него параметров циркуляционного движения заготовки была проведена серия экспериментов, ос-

нованная на визуализации траектории движения точки, принадлежащей заготовке, относительно вращающегося диска.

Методика проведения этих экспериментов заключалась в следующем. На боковой поверхности отрезного диска 4 закреплялся бумажный диск 1 (рисунок 4.37), выполняющий роль носителя информации.

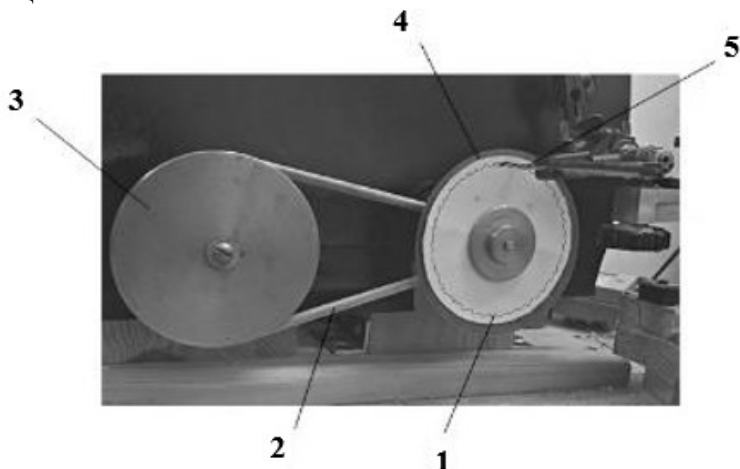


Рис. 4.37. Узел регистрации траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращающегося диска:

- 1 – бумажный диск; 2 – ременная передача; 3 – шкив; 4 – отрезной диск;
- 5 – стержень гелевой ручки

На стреле в месте крепления оправки с образцом устанавливался стержень от гелиевой ручки 5, который с небольшим усилием прижимался к поверхности бумажного диска. Для обеспечения низкой частоты вращения последнего использовался отдельный шаговый электродвигатель (на рисунке он не виден), на валу которого закреплялся шкив 3. Вращение последнего передавалось на свободно вращающийся вал неработающего электродвигателя посредством ременной передачи 2. Частота вращения диска с бумажным носителем регулировалась за счет изменения частоты вращения вала шагового электродвигателя.

На рисунке 4.38 представлены примеры записи траекторий движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращаю-

шегося диска при различной частоте возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции.



Рис. 4.38. Траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращающегося диска ($n = 10 \text{ мин}^{-1}$) при различной частоте f возбуждения колебательной системы распиловочной секции за один оборот диска: а – $f = 4 \text{ Гц}$; б – $2,8 \text{ Гц}$, в – $3 - 2 \text{ Гц}$

Их анализ показывает, что с возбуждением колебательной системы траектория движения точки приобретает пилообразный вид с четко выраженным периодическим характером изменения ее параметров. В частности (рисунок 4.39), к ним относятся величина размаха вертикальных (радиальных) смещений A_v , значение шага между выступами p и угол наклона τ линии, соединяющей вершины соседних впадин и выступов (точки A и B) и касательной, проведенной в точке B .

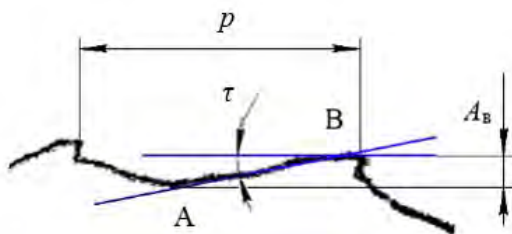


Рис. 4.39. Увеличенный фрагмент траектории движения точки, принадлежащей заготовке, с указанием характеризующих ее параметров

Показано, что с увеличением частоты возбуждения колебательной системы величина A_v и значение угла τ возрастают, а величина p снижается.

Из полученных экспериментальных данных следует, что с увеличением частоты возбуждения колебательной системы f величина

A_v и значение угла τ возрастают, а величина p снижается. Связано это с тем, что, как было установлено ранее, с повышением f изменяются параметры эллиптической траектории: увеличиваются размеры малой и большой осей эллипса, а также происходит поворот последней в сторону вертикальной оси. Одновременно уменьшается период циркуляционного движения точки по эллиптической траектории, что сопровождается возрастанием средней за это время скорости ее перемещения по ней.

Влияние частоты вращения диска на траекторию движения точки, принадлежащей заготовке, при неизменной частоте возбуждения колебательной системы, равной 4 Гц, отражают данные, представленные на рисунке 4.40.

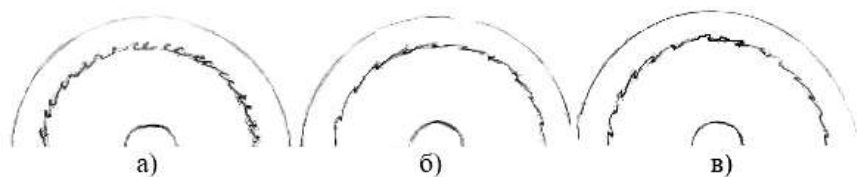


Рис. 4.40. Траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности диска при различной частоте его вращения (n_d) и неизменной частоте возбуждения колебательной системы f , равной 4 Гц:
а – $n_d = 8 \text{ мин}^{-1}$; б – 10 мин^{-1} ; в – 12 мин^{-1}

Из них видно, что с повышением n_d происходит увеличение параметра p траектории движения точки с одновременным уменьшением угла τ при практически постоянной величине A_v . В результате в сторону уменьшения изменяется отношение пути, проходимого точкой в единицу времени на поверхности вращающегося диска в вертикальном (радиальном) направлении, к пути, проходимому в горизонтальном направлении, т.е. в направлении вектора окружной скорости вращения диска.

Таким образом, результатами проведенных экспериментов установлено, что за счет изменения частоты возбуждения колебательной системы, а соответственно параметров эллиптической траектории движения заготовки и частоты вращения отрезного диска можно управлять условиями их скольжения. В частности, значением размаха A_v вертикальных смещений, шагом выступов p и величиной

угла τ . В свою очередь, это позволяет влиять на условия формирования микрорельефа на поверхности пропиленных участков заготовки. Как уже отмечалось, наличие вертикально направленных относительных колебательных смещений заготовки и боковой поверхности диска обеспечивает условие неповторяемости следов обработки, что должно положительно сказываться на снижении шероховатости распиленной поверхности заготовки.

Для подтверждения этого положения была проведена серия экспериментов по физическому моделированию процесса взаимодействия (истирания) пропиленных участков заготовки с боковой поверхностью отрезного диска. На рисунке 4.41 приведена фотография зоны обработки, поясняющая условия проведения этих экспериментов.

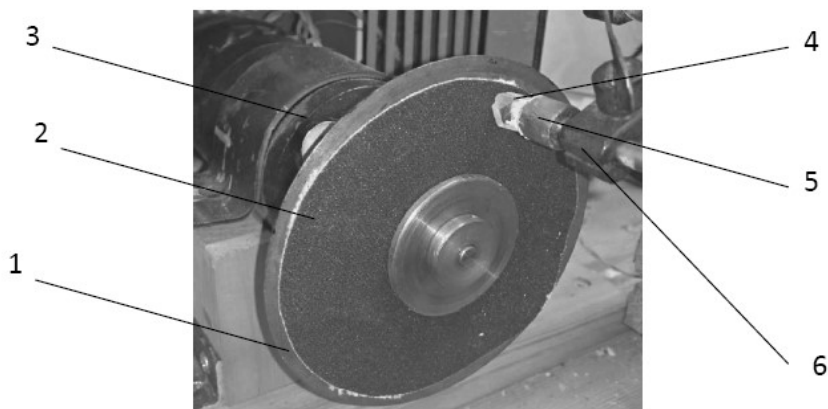


Рис. 4.41. Зона обработки при проведении экспериментов по истиранию поверхности образца:

- 1 – отрезной диск; 2 – диск из шлифовальной шкурки; 3 – электродвигатель;
4 – стеклянный образец; 5 – оправка; 6 – зажимное устройство

На боковой поверхности отрезного диска 1 закреплялся предварительно вырезанный из шлифовальной шкурки диск 2, вращение которому сообщалось от электродвигателя 3. Стеклянный образец 4 закреплялся в цилиндрической оправке 5, которая устанавливалась в зажимном устройстве 6 стрелы распиловочной секции. Торцевая поверхность образца, моделирующая его распиленную поверхность,

с небольшим усилием прижималась к шлифовальной шкурке, которая моделировала боковую поверхность отрезного диска. Процесс истирания поверхности образца осуществлялся как в обычных условиях обработки, так и при сообщении ему циркуляционного движения. Частота вращения диска составляла 7500 мин^{-1} , продолжительность истирания 10 с. После этого оправка с образцом и диск из шлифовальной шкурки снимались, и с помощью микроскопа МИМ-1 исследовалось состояние их поверхностей.

На рисунке 4.42 приведены фотографии поверхности стеклян-ного образца, полученные при ее истирании о поверхность шлифовальной шкурки в обычных условиях и при возбуждении колебательной системы с частотой 4 Гц.

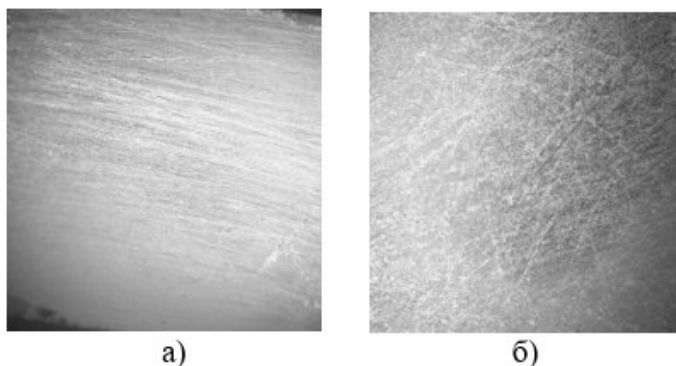


Рис. 4.42. Поверхность стеклян-ного образца после ее истирания (увеличение $50\times$):
а – в обычных условиях; б – при возбуждении колебательной системы с частотой 4 Гц

Как видно, на поверхности образца при ее истирании в обычных условиях (рисунок 4.42а) присутствуют однонаправленные следы обработки (риски), имеющие значительные размеры. Во втором случае (рисунок 4.42б) на поверхности образца практически отсутствуют однонаправленные следы обработки, и она характеризуется более равномерным микрорельефом с меньшей, чем в первом случае, высотой неровностей.

На рисунке 4.43 представлены фотографии поверхности диска из шлифовальной шкурки с дорожками износа, полученными при ис-

тирании образца в обычных условиях и при сообщении ему циркуляционного движения по эллиптической траектории.

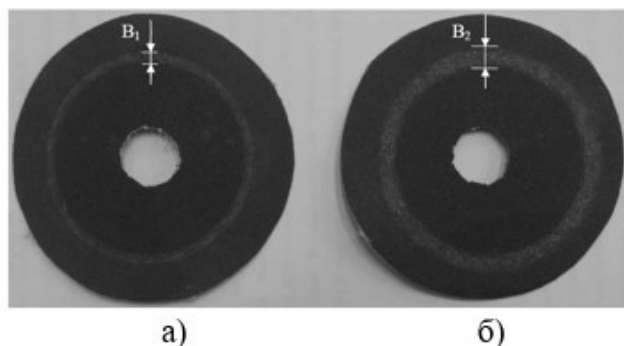


Рис. 4.43. Поверхность диска с дорожкой износа, полученной при истирании образца: а – в обычных условиях; б – при сообщении образцу циркуляционного движения по эллиптической траектории

Как видно, ширина дорожки износа B_2 при истирании образца с возбуждением колебательной системы превышает аналогичный параметр дорожки B_1 , полученной при истирании образца в обычных условиях. Понятно, что это обусловлено наличием вертикально (радиально) направленных колебательных смещений заготовки относительно поверхности шлифовальной шкурки. При этом разность $(B_2 - B_1)$ соответствует величине A_v , которая зависит от значения большой оси d эллиптической траектории и угла ее наклона λ к горизонтальной оси, т.е. $A_v \sim d \sin \lambda$. В случае, когда угол λ равен нулю, величина A_v будет соответствовать размеру малой оси q эллиптической траектории движения заготовки. Поэтому, учитывая влияние режимов возбуждения колебательной системы на параметры эллиптической траектории движения заготовки, можно прогнозировать их влияние на шероховатость распиленной поверхности заготовки. В частности, с повышением частоты возбуждения колебательной системы, которое сопровождается возрастанием величины d и значения угла λ эллиптической траектории движения заготовки, обосновано ожидать возрастания степени влияния этого движения на снижение шероховатости поверхности площадок распиленных полуфабрикатов по сравнению с обработкой в обычных условиях.

Таким образом, по результатам физического моделирования процесса истирания распиливаемой поверхности заготовки с боковой поверхностью шлифовальной шкурки (диска) подтверждено положение о том, что сообщение ей циркуляционного движения по эллиптической траектории позволяет снизить, в сравнении с истиранием в обычных условиях, шероховатость поверхности площадок распиленных полуфабрикатов. При этом степень указанного снижения возрастает с увеличением размера большой оси эллиптической траектории и угла ее наклона относительно горизонтали.

4.3. Экспериментальные исследования процесса механического распиливания хрупких неметаллических материалов с циркуляционным движением заготовки

В настоящем разделе представлены и обсуждены результаты экспериментов, отражающие влияние режимов обработки при выполнении операции механического распиливания образцов из различных по твердости хрупких неметаллических материалов с использованием созданной секции на интенсивность их распиливания и качество обработанных поверхностей [151]. Количественная оценка этого влияния проводилась путем сравнения значений указанных показателей, полученных при распиливании образцов по традиционной технологии и при сообщении им управляемого циркуляционного движения. Методика проведения этих сравнительных экспериментов, включая описание последовательности их выполнения, подробно изложена в разделах 4.1.4 и 4.1.5.

В ходе их проведения варьировались следующие параметры режима обработки: статическое усилие $P_{ст.в}$ прижатия регулировочного винта к нижнему ограничителю (от 1,2 до 6,5 Н), частота f возбуждения колебательной системы (от 0 до 4 Гц), величина зазора Z между стрелой и верхним ограничителем (от 0 до 4 мм). Во всех экспериментах частота вращения диска n_d и амплитуда вынужденных колебаний A , сообщаемых узлу качания стрелы, были неизменными и соответственно составляли 7500 мин^{-1} и 3,5 мм, СОЖ не применялась.

4.3.1. Влияние режимов обработки на интенсивность распиливания образцов

Первая серия экспериментов была посвящена оценке влияния циркуляционного движения образца на интенсивность его распиливания при двух вариантах выполнения операции: при встречном и попутном его взаимодействии с диском. В первом случае вектор горизонтальной составляющей скорости точки на образце за время его ударно-фрикционного взаимодействия с торцевой поверхностью диска направлен противоположно вектору окружной скорости последнего, а во втором – направление этих векторов совпадает. В ходе выполнения экспериментов обеспечение первого или второго варианта распиливания осуществлялось путем изменения направления вращения диска при следующих режимах обработки: $f = 4$ Гц, $Z = 3$ мм и $P_{ст.в} = 6,5$ Н.

Анализ результатов по распиливанию образцов при попутном и встречном вариантах выполнения операции показал, что соответствующие им значения интенсивности распиливания отличаются весьма незначительно (в пределах 3–7 %). В частности, для стеклянного образца значение i при встречном варианте распиливания составило $1,08$ мм²/с, а при попутном – $0,96$ мм²/с. При распиливании образца из нефрита значения i соответственно составили $0,39$ и $0,36$ мм²/с. Объясняется это существенным различием частоты циркуляционного движения образца (4 Гц) и частоты вращения диска (125 Гц), в результате чего изменение варианта распиливания незначительно сказывается на силовых и временных параметрах их ударно-фрикционного взаимодействия, а соответственно на интенсивности разрушения материала образца. Вместе с тем, несколько большему значению i соответствует вариант встречного распиливания, который был принят в ходе проведения всех последующих экспериментов.

На рисунке 4.44 приведены данные, отражающие влияние частоты возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции на значения интенсивности распиливания образцов i , которые получены при $P_{ст.в} = 6,5$ Н и $Z = 3$ мм [142, 151, 158].

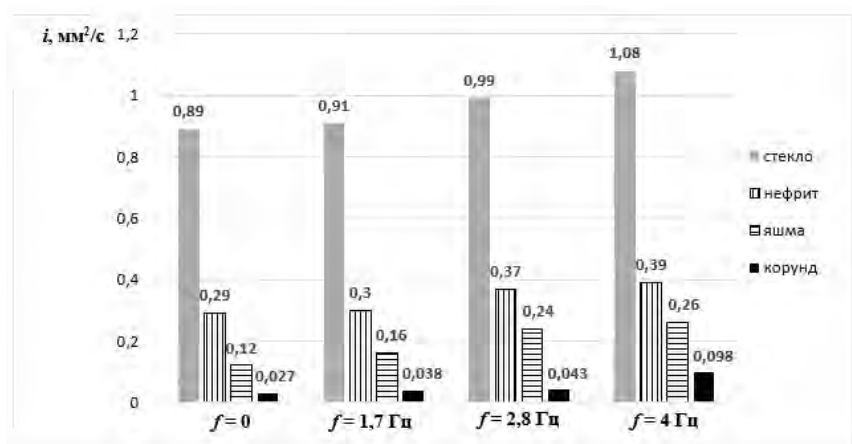


Рис. 4.44. Диаграмма зависимости интенсивности распиливания образцов при обработке в обычных условиях ($f=0$) и при возбуждении системы с различной частотой колебаний

Из анализа полученных данных видно, что во всех случаях с повышением частоты вынужденных колебаний с 1,7 до 4 Гц интенсивность распиливания образцов возрастает по сравнению с их распиливанием в обычных условиях ($f=0$). При этом чем ниже твердость материала образца, тем выше значение параметра i как при его распиливании в обычных условиях, так и с использованием колебаний [159]. Важно отметить то обстоятельство, что степень влияния последних на повышение интенсивности распиливания образцов возрастает с увеличением их твердости. Так, для стеклянного образца (4 единицы твердости по шкале Мооса) отношение значений интенсивности его распиливания с применением колебаний частотой 4 Гц и в обычных условиях составило 1,21; для нефрита (6 единиц твердости) – 1,34; для яшмы (7 единиц твердости) – 2,16 и для корунда (9 единиц твердости) – 3,6. Наличие такой зависимости дает основание полагать, что предложенная технология также позволит существенно повысить интенсивности распиливания кристаллов алмаза, имеющих наивысшую твердость (10 единиц по шкале Мооса).

Влияние величины зазора между стрелой и верхним ограничителем на интенсивность распиливания образцов отражают данные,

приведенные на рисунке 4.45, которые получены при $P_{ст.в} = 6,5$ Н и $f = 4$ Гц [151].

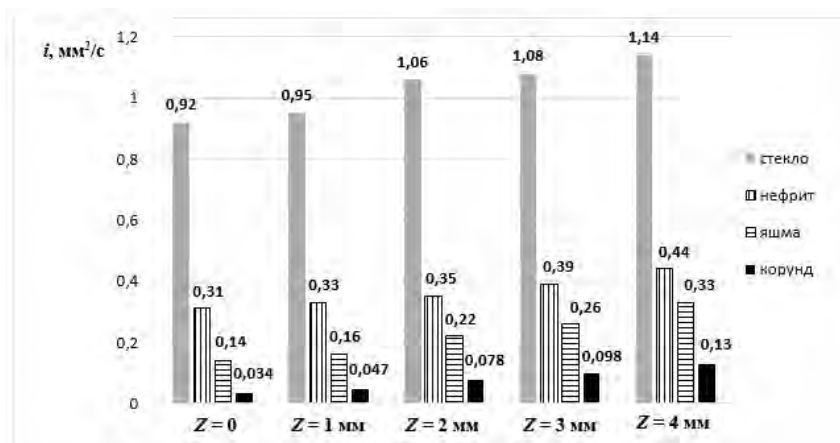


Рис. 4.45. Диаграмма зависимости интенсивности распиливания образцов от величины зазора между стрелой и верхним ограничителем

Из сравнительного анализа полученных данных видно, что по мере увеличения зазора, начиная с его нулевого значения, интенсивность распиливания образцов возрастает, достигая своего наибольшего значения при $Z = 4$ мм. По сравнению с обработкой в обычных условиях в этом случае интенсивность распиливания стеклянного образца возросла в 1,28 раза, образца из нефрита – в 1,52 раза, образца из яшмы – в 2,75 раза и корундового образца – в 4,81 раза.

На рисунке 4.46 представлена зависимость интенсивности распиливания стеклянного образца от статического усилия его прижатия к торцевой поверхности диска при распиливании в обычных условиях и с возбуждением колебательной системы на различной частоте при $Z = 3$ мм [151].

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением $P_{ст.в}$ интенсивность распиливания образца как в обычных условиях выполнения операции, так и при возбуждении колебательной системы возрастает. При этом с повышением частоты ее возбуждения значение i увеличивается.

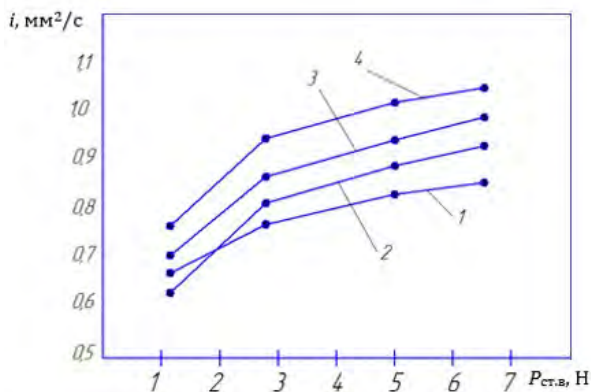


Рис. 4.46. Зависимость интенсивности распиливания стеклянного образца от статического усилия его прижатия к торцевой поверхности диска: 1 – в обычных условиях распиливания; 2 – при $f = 1,7 Гц$; 3 – $2,8 Гц$; 4 – $4 Гц$

Вместе с тем, при частоте возбуждения колебательной системы, равной $1,7 Гц$, и величине $P_{ст.в}$, меньше $3 Н$, значение интенсивности распиливания образца становится несколько ниже, чем при обработке в обычных условиях. Аналогичный характер зависимости $i(P_{ст.в})$ сохраняется при распиливании образцов из других исследуемых материалов.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что путем сообщения образцу (заготовке) управляемого циркуляционного движения можно по сравнению с обработкой в обычных условиях существенно повысить интенсивность его распиливания. Кроме того, в этом случае расширяется арсенал параметров режима обработки, позволяющих эффективно управлять интенсивностью протекания процесса. Так, помимо статического усилия прижатия заготовки к торцевой поверхности диска, которое используется в качестве единственного параметра управления при традиционном распиливании, дополнительно можно использовать параметры, характеризующие условия возбуждения колебательной системы, в частности частоту и амплитуду вынужденных колебаний, а также величину зазора между стрелой и верхним ограничителем.

Для объяснения установленных зависимостей воспользуемся результатами теоретико-экспериментальных исследований, приведенными в разделе 4.2.1. На основании сопоставления данных, приве-

денных в таблицах 4.4–4.6 с результатами экспериментов, представленных на рисунках 4.44–4.46, следует вывод о том, что доминирующее влияние на повышение интенсивности распиливания образцов оказывает значение угла λ эллиптической траектории движения образца, с увеличением которого интенсифицируется процесс их хрупкого разрушения. Для его качественного описания обратимся к схемам, представленным на рисунке 4.47 [151].

В традиционных условиях распиливания (рисунок 4.47а) алмазное зерно 2, закрепленное на торцевой поверхности вращающегося со скоростью v_d диска 3, под действием статической нагрузки $P_{ст}$ прижимается к обрабатываемой поверхности заготовки 1. В результате их силового взаимодействия в поверхностном слое материала формируется предразрушенный слой толщиной H , величина которого возрастает с повышением $P_{ст}$ [95, 96]. При повторном воздействии алмазного зерна на этот ослабленный слой происходит разрушение материала заготовки путем скалывания его частиц, количество и размер которых определяются толщиной слоя H и степенью поврежденности материала в нем. Последняя характеризуется глубиной, количеством и расположением образовавшихся в его поверхностном слое микротрещин. Тогда за время, равное периоду циркуляционного движения заготовки $T_{ц}$, с ее поверхности будет удален слой материала толщиной H и протяженностью $T_{ц} \times v_d$, который на рисунке 4.47 выделен черным цветом.

При сообщении заготовке циркуляционного движения по эллиптической траектории (рисунок 4.47б) в результате косоугольного соударения алмазного зерна с ее поверхностью на ней образуется предразрушенный слой материала, отличающийся по форме и размерам от слоя, сформированного под действием статической нагрузки. Так, в силу импульсного характера действия сжимающей нагрузки, которая, как было установлено выше, может в разы превышать значение $P_{ст}$, за время t_k ударно-фрикционного взаимодействия алмазного зерна с заготовкой толщина этого слоя оказывается переменной и характеризуется ее максимальным значением H_{max} , а также расстоянием их относительного перемещения за время t_k . Учитывая, что частота вращения диска значительно превосходит частоту циркуляционного движения заготовки, величину этого расстояния оправдано определить как произведение $v_d \times t_k$. Если учесть, что значение H_{max} существенно превышает величину H , то площадь удаляемого

за время контактного взаимодействия поверхностей слоя материала образца оказывается больше, чем при распиливании в обычных условиях. Соответственно будут выше объем и масса удаляемого в единицу времени материала, а следовательно, и значение интенсивности его распиливания.

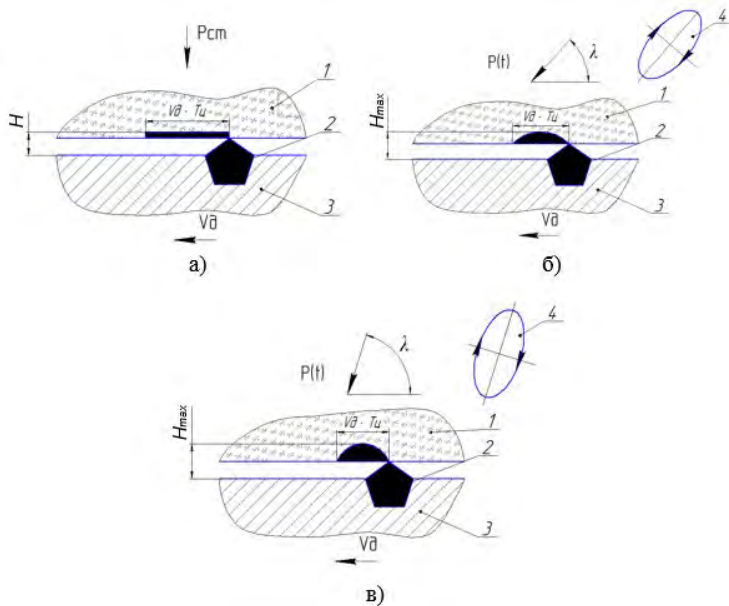


Рис. 4.47. Схемы, поясняющие влияние параметров циркуляционного движения заготовки на условия протекание процесса хрупкого разрушения ее материала в процессе распиливания:

- 1 – заготовка; 2 – алмазное зерно; 3 – диск; 4 – траектория; v_d – скорость диска;
 H – толщина слоя; T_u – период циркуляционного движения заготовки

На рисунке 4.47в показана форма поперечного сечения удаляемого с поверхности образца материала при большем, чем в предыдущем случае, значении угла λ эллиптической траектории движения образца. Как видно, в данном случае, несмотря на уменьшение произведения $v_d \times t_k$, за счет снижения значения последнего множителя, в результате увеличения параметра H_{max} площадь удаляемого

материала за период циркуляционного движения образца будет больше, чем в предыдущем случае.

Отмеченные положения подтверждаются результатами экспериментов, когда при распиливании во время стадии ударно-фрикционного взаимодействия образца с диском визуально наблюдается интенсивный выброс из зоны обработки порции частиц разрушенного материала (рисунок 4.48), что отсутствует при обработке в обычных условиях.



Рис. 4.48. Момент интенсивного выброса частиц разрушенного материала из зоны распиливания во время ударно-фрикционного взаимодействия стеклянного образца с диском

Причем, как видно из приведенных в таблице 4.7 данных, полученных при $f = 4$ Гц, $P_{ст.в} = 6,5$ Н и $Z = 3$ мм, средний размер этих частиц оказывается значительно меньше, чем частиц, образовавшихся при распиливании в обычных условиях [151]. Из анализа представленных данных видно, что с повышением твердости материала образца при его распиливании как в обычных условиях, так и с использованием циркуляционного движения средний размер отделившихся частиц материала уменьшается. При этом степень влияния ударно-фрикционного режима распиливания на снижение размера частиц возрастает. Так, отношение $\varepsilon_0/\varepsilon_c$ для стеклянного образца составило 1,67, для образца из нефрита – 1,81, для образца из яшмы – 1,91 и для корундового образца – 2,2. Этим подтверждается тот факт, что в результате ударно-фрикционного взаимодействия указанных поверхностей возрастает не только глубина предразру-

шенного слоя материала заготовки, но и степень его повреждения, что приводит к уменьшению размера отделившихся от него частиц.

Таблица 4.7 – Средний размер частиц разрушенного материала образца при распиливании в обычных условиях и с использованием циркуляционного движения заготовки

Материал распиливаемого образца	Средний размер частиц разрушенного ма- териала, мкм		
	при обра- ботке в обычных условиях ε_0	с использовани- ем циркуляцион- ного движения образца $\varepsilon_{ц}$	отношение $\varepsilon_0/\varepsilon_{ц}$
Стекло	72	43	1,67
Нефрит	56	31	1,81
Яшма	44	23	1,91
Корунд	33	15	2,2

Таким образом, полученными результатами экспериментальных исследований установлено, что сообщение заготовке управляемого циркуляционного движения обеспечивает в сравнении с традиционной обработкой повышение интенсивности распиливания хрупких неметаллических материалов. При этом с увеличением твердости обрабатываемого материала степень влияния циркуляционного движения заготовки на повышение этого технологического показателя возрастает. Показано, что в основе механизма влияния циркуляционного движения заготовки на повышение этого технологического показателя лежит процесс ударно-фрикционного взаимодействия торцевой поверхности диска с заготовкой, при котором, в сравнении с распиливанием в обычных условиях, увеличивается как глубина предразрушенного слоя материала, так и степень его повреждения, что в совокупности способствует интенсификации протекания процесса его распиливания. Установлено, что влияние режимов обработки на интенсивность распиливания проявляется через их влияние на изменение параметров формируемой эллиптической траектории движения образца. Так, с увеличением угла λ наклона ее большей оси к горизонтали, что обеспечивается повы-

шением f , Z и $P_{\text{ст.в}}$, интенсивность распиливания во всех случаях возрастает.

Оправдано полагать, что виброударный режим распиливания будет оказывать влияние на уровень эксплуатационных показателей отрезного диска, в частности на величину его относительной или удельной износостойкости. Под последней будем понимать суммарную пропиленную площадь данного образца одним диском до момента, когда интенсивность распиливания им не снизится до двух раз от первоначальной.

Для изучения этого вопроса проведена отдельная серия экспериментов по следующей методике. Были использованы два одинаковых отрезных алмазных диска (АСН 60/40), которыми распиливались образцы из яшмы в одном случае в обычных условиях ($P_{\text{ст.в}} = 6,5$ Н), а в другом – с возбуждением колебательной системы ($f = 4$ Гц, $Z = 3$ мм и $P_{\text{ст.в}} = 6,5$ Н). При этом в обоих случаях фиксировалось изменение интенсивности распиливания (i_0/i_k) по мере увеличения количества обработанных образцов и определялась суммарная площадь распила (F), полученная одним диском до момента, когда $i_k = 0,5i_0$.

Результатами исследований установлено, что при уменьшении интенсивности распиливания в два раза по сравнению с первоначальной суммарная площадь распиленной поверхности образцов при обработке в обычных условиях F_T составила 168,5 мм², при обработке с возбуждением колебательной системы $F_{\text{ц}} = 882,3$ мм². Из сравнения полученных данных следует, что сообщение образцу циркуляционного движения, обеспечивающего виброударный режим распиливания, повышает по сравнению с обработкой в обычных условиях относительную износостойкость отрезного диска более чем в пять раз. Это свидетельствует о том, что наличие циркуляционного движения заготовки создает благоприятные условия для работы алмазных зерен, закрепленных на поверхности диска, в результате чего они более длительное время сохраняют высокую режущую способность.

С помощью инфракрасного пирометра НИМБУС (диапазон измерений от 0 до 400 °С, цена деления 0,1 °С) была измерена интегральная температура в зоне обработки при распиливании образцов из стекла, яшмы и корунда. По результатам проведенных экспериментов установлено, что сообщение образцу циркуляционного дви-

жения не оказывает по сравнению с распиливанием в обычных условиях существенного влияния на изменение температуры в зоне обработки, значение которой находилось в пределах 24–32 °С.

4.3.2. Влияние режимов распиливания образцов на качество их обработанных поверхностей

Специальная серия экспериментов была посвящена оценке влияния сообщаемого заготовке циркуляционного движения на ширину получаемого на ней распила, которая напрямую определяет уровень безвозвратных потерь сырья при выполнении операции распиливания. Для этого с помощью алмазного отрезного диска с шириной режущей кромки 0,23 мм производилось распиливание стеклянного образца, начиная с ребра до половины его толщины. В одном случае образец пропиливался в обычных условиях обработки ($P_{ст.в} = 6,5$ Н), а в трех других – с возбуждением колебательной системы с частотой 1,2; 2,8 и 4 Гц при $P_{ст.в} = 6,5$ Н и $Z = 3$ мм. Затем с помощью функции «измерение» программы photoshop определялась ширина w пропилов, полученных на боковой поверхности образца.

В результате установлено, что при частоте возбуждения колебательной системы, не превышающей 2,8 Гц, ширина пропила не отличается от ее значения, соответствующего обычным условиям обработки ($w_1 = w_2 = 0,44$ мм), а при больших значениях f (2,8 до 4 Гц) она увеличивается ($w_3 = 0,45$ мм) в пределах 1,5–3%. Очевидно, это может быть связано с тем, что при высокой интенсивности виброударного режима взаимодействия образца с режущей кромкой диска в нем возбуждаются изгибные колебания, вызывающие «разбивание» пропила. Кроме того, при указанных частотных ограничениях возбуждения колебательной системы в значительной степени устраняется явление скалывания материала образца в момент окончания его распиливания.

Влияние частоты возбуждения колебательной системы на значение параметра R_a шероховатости распиленной поверхности образцов отражают данные, представленные на рисунке 4.49, которые получены при $P_{ст.в} = 6,5$ Н и $Z = 3$ мм [151].

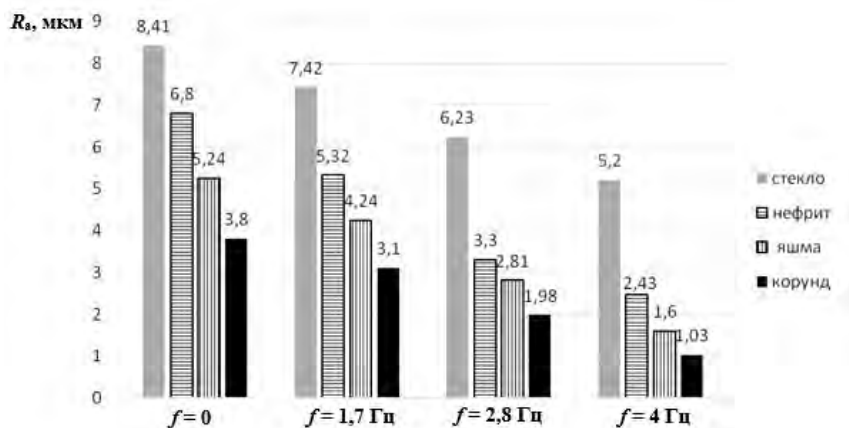


Рис. 4.49. Диаграмма зависимости параметра R_a шероховатости распиленной поверхности образцов при их обработке в обычных условиях и при сообщении узлу качания стрелы вынужденных колебаний различной частоты

При анализе полученных экспериментальных данных необходимо отметить следующие положения. Как при обработке в обычных условиях, так и с использованием циркуляционного движения образца с повышением твердости его материала значение параметра R_a снижается. Сообщение образцу циркуляционного движения позволяет существенно повысить качество его распиленной поверхности. При этом степень его положительного влияния возрастает с повышением частоты возбуждения колебательной системы. Так, при $f = 4$ Гц значение параметра R_a шероховатости распиленной поверхности образцов снизилось по сравнению с обработкой в обычных условиях: для стекла в 1,61 раза; для нефрита – в 2,0 раза; для яшмы – в 3,25 раза и для корунда – в 3,63 раза.

Существенным образом на изменение шероховатости распиленной поверхности образцов влияет величина зазора Z , с увеличением которого значение параметра R_a снижается, как показано на рисунке 4.50. Эти данные получены при $P_{ст.в} = 6,5$ Н и $f = 4$ Гц [151].

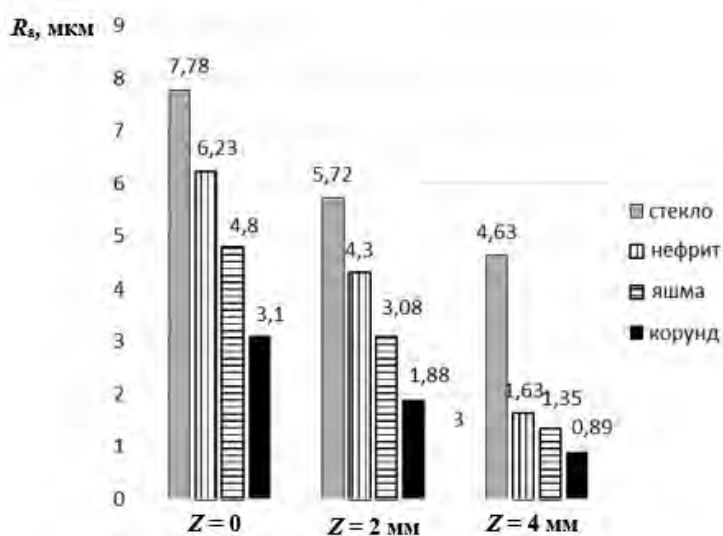


Рис. 4.50. Диаграмма зависимости параметра R_a шероховатости распиленной поверхности образцов от величины зазора между стрелой и верхним ограничителем

Следует отметить, что в ходе выполнения этой серии экспериментов при величине зазора, равной 4 мм, частоте $f = 4$ Гц и $P_{ст.в} = 6,5$ Н наблюдались сколы на поверхности образцов, возникающие на стадии окончания их распиливания. Объясняется это чрезмерной для данного перехода распиливания интенсивностью виброударного режима работы колебательной системы. Попутно заметим, что к аналогичной ситуации приводит увеличение частоты возбуждения колебательной системы свыше 4 Гц. Поэтому с целью предотвращения этого нежелательного явления необходимо в процессе выполнения операции с учетом ее конкретного перехода управлять интенсивностью этого режима. Детально решение этой задачи будет рассмотрено ниже при определении рациональных режимов распиливания.

Влияние статического усилия прижатия стеклянного образца к торцевой поверхности диска на значение параметра R_a шероховатости распиленной поверхности при обработке в обычных условиях и

с использованием циркуляционного движения заготовки отражают данные, приведенные на рисунке 4.51 ($Z = 3$ мм) [151].

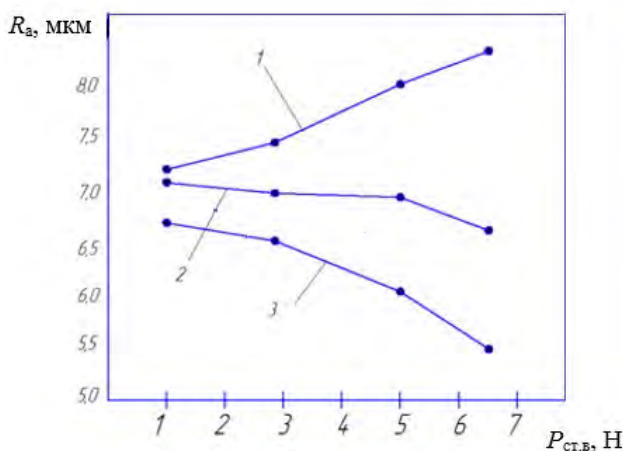


Рис. 4.51. Зависимость параметра R_a шероховатости распиленной поверхности стеклянного образца от статического усилия его прижатия к торцевой поверхности диска:

- 1 – при распиливании в обычных условиях; 2 и 3 – с возбуждением колебательной системы соответственно на частоте 1,7 и 4 Гц

Как видно, при распиливании в обычных условиях с повышением величины $P_{ст.в.}$ в диапазоне от 1,2 до 6,5 Н значение параметра R_a возрастает с 7,22 до 8,41 мкм. В то время как при сообщении образцу циркуляционного движения значение параметра R_a с увеличением $P_{ст.в.}$ снижается, оставаясь во всем диапазоне изменения $P_{ст.в.}$ меньше, чем при распиливании в обычных условиях. Причем с повышением частоты возбуждения колебательной системы степень этого снижения возрастает.

Установленные экспериментальные зависимости, отражающие влияние режимов возбуждения колебательной системы на качество распиленной поверхности образцов, объясняются следующими особенностями протекания процесса формирования на ней окончательного микрорельефа. Как указывалось в разделе 4.2, снижение шероховатости распиливаемой поверхности образца при сообщении ему циркуляционного движения, в первую очередь, связано с нали-

чим ее дополнительного скольжения относительно боковой поверхности диска в вертикальном направлении, т.е. перпендикулярно вектору скорости вращения диска. Благодаря этому обеспечивается условие неповторяемости следов обработки на распиливаемой поверхности образца, в результате чего происходит сглаживание (затираание) на ней микронеровностей.

При раскрытии механизма влияния режимов обработки на шероховатость распиленной поверхности образца также следует исходить из оценки их влияния на параметры эллиптической траектории его движения. Так, с повышением частоты возбуждения колебательной системы происходит увеличение угла λ и большой оси эллипса (таблица 4.4), что вызывает рост размаха колебательных смещений заготовки A_v относительно боковой поверхности диска в вертикальном направлении. В результате этого в большей степени реализуется условие неповторяемости следов обработки на поверхности образца, а также интенсифицируется процесс затираания на ней образовавшихся неровностей, что в совокупности способствует снижению ее шероховатости (рисунок 4.52).

В первом случае на распиленной поверхности образца четко видны однонаправленные следы обработки (рисунок 4.9а), формирующие на ней значительные по высоте микронеровности. После обработки с возбуждением колебательной системы (рисунок 4.9б) на распиленной поверхности отсутствуют однонаправленные следы обработки, она характеризуется значительно меньшей высотой микронеровностей и по внешнему виду напоминает поверхность, полученную после операции тонкого шлифования или притирки свободным абразивом.

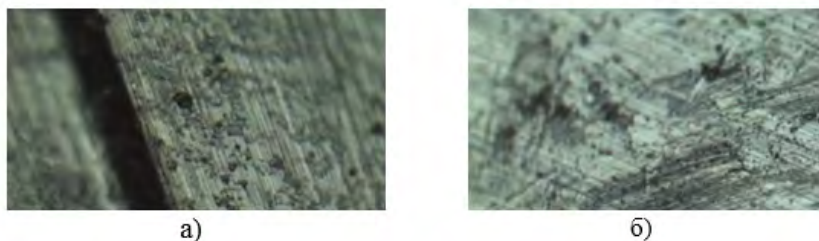


Рис. 4.52. Распиленная поверхность корундового образца при увеличении $16\times$: а – при обработке в обычных условиях; б – при возбуждении колебательной системы ($f = 4$ Гц, $Z = 3$ мм и $P_{ст.в} = 6,5$ Н)

Таким образом, экспериментально подтверждено, что сообщение образцу управляемого циркуляционного движения позволяет повысить в сравнении с обработкой в обычных условиях качество его распиленной поверхности. Показано, что в основе механизма этого влияния лежит изменение условий изнашивания распиливаемой поверхности образца с боковыми поверхностями распиловочного диска. В частности, наличие вертикальных колебательных смещений пропиленной поверхности образца относительно боковой поверхности диска, которые отсутствуют при распиливании по традиционной технологии, обеспечивает реализацию условия неповторяемости следов обработки, а также вызывает эффект затирания (сглаживания) неровностей на обрабатываемой поверхности образца. На степень проявления последнего, помимо угла λ , оказывает влияние отношение малой и большой осей эллиптической траектории, т.е. ее форма. Так, при постоянном значении угла λ с увеличением отношения q/d указанный эффект, вызывающий снижение шероховатости распиленной поверхности, проявляется в большей степени, что обусловлено возрастанием пути ее скольжения относительно боковой поверхности диска за период циркуляционного движения образца.

Косвенным подтверждением того, что наличие циркуляционного движения образца приводит к увеличению в сравнении с традиционным распиливанием величины сил трения могут служить экспериментально полученные осциллограммы изменения сил сопротивления F_c , действующих в зоне обработки, которые приведены на рисунке 4.53. Как видно, в начале распиливания, т.е. при небольшом заглублении диска в образец, значение F_c при обработке в обычных условиях выше, чем при циркуляционном движении образца. При дальнейшем увеличении глубины пропила соотношение между этими силами сопротивления изменяется на противоположное, которое сохраняется до окончания выполнения операции.

Заметим, что на полученных осциллограммах фиксируется значение сил сопротивления, которые складываются из сил резания, возникающих при взаимодействии образца с торцевой поверхностью диска, и сил трения, действующих между его боковыми поверхностями и пропиленными участками на образце.

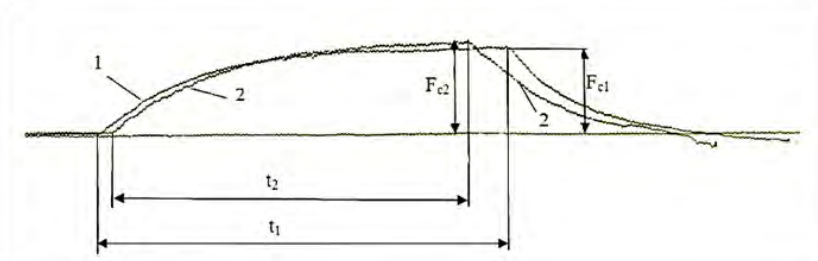


Рис. 4.53. Осциллограммы изменения сил сопротивления, действующих в зоне обработки за время распиливания образца из стекла:
 1 – при распиливании в обычных условиях ($P_{ст.в} = 6,5$ Н); 2 – при возбуждении колебательной системы ($P_{ст.в} = 6,5$ Н, $f = 4$ Гц и $Z = 3$ мм)

Поэтому при небольшой глубине пропила, т.е. в начале распиливания, когда площадь контакта указанных поверхностей незначительная, значение сил сопротивления будет определяться главным образом действующими в зоне обработки силами резания. В условиях ударно-фрикционного взаимодействия торцевой поверхности диска с образцом в силу периодического разрыва между ними механического контакта значение силы резания оказывается меньше, чем при распиливании в обычных условиях, когда между этими поверхностями имеет место постоянный контакт.

По мере увеличения глубины пропила возрастает площадь контакта боковых поверхностей диска с образцом, а соответственно действующие по площадкам контакта силы трения, что приводит к повышению значения F_c . В этой ситуации при распиливании с возбуждением колебательной системы за счет увеличения в сравнении с обработкой в обычных условиях пути относительного скольжения поверхностей работа сил трения за время распиливания образца оказывается больше.

Сопоставляя полученные в данной главе экспериментальные данные с данными, отражающими влияние режимов обработки на параметры формируемой эллиптической траектории движения образца, следует отметить следующее. В этом случае уровень выходных показателей операции распиливания хрупких неметаллических материалов (производительность, качество обработанных поверхностей) зависит от значения угла λ наклона большой оси эллипса к горизонтали, размеров его осей и соотношения q/d , которые опре-

деляют силовые и временные параметры ударно-фрикционного взаимодействия образца с диском. Последние в свою очередь влияют на интенсивность протекания процесса хрупкого разрушения материала образца и условия формирования микрорельефа на его распиленной поверхности. Так, с увеличением угла λ и отношения q/d , что обеспечивается повышением частоты f , величины зазора Z и статической нагрузки $P_{ст}$, возрастают значение нормальной составляющей ударного импульса и величина размаха вертикальных смещений заготовки относительно боковых поверхностей диска. В результате увеличиваются глубина предразрушенного слоя материала образца и степень его повреждения в нем, что в совокупности интенсифицирует процесс хрупкого разрушения и одновременно активизирует протекание процесса сглаживания (затираания) неровностей на распиленной поверхности образца, обуславливая снижение ее шероховатости.

4.4.1. Создание распиловочной секции с управляемым циркуляционным движением заготовки

В качестве базового варианта, на основе которого была создана распиловочная секция, использовалась промышленная распиловочная секция станка модели ШП-2. Поэтому создание нового варианта секции в принципе следует рассматривать как мало затратную модернизацию ее промышленной конструкции.

С целью ее осуществления в конструкцию последней были внесены следующие изменения и добавления, для чего использовались отдельные узлы экспериментальной распиловочной секции: в частности, узел упругого подвеса стрелы, узел привода электромеханического вибратора, конструкции нижнего и верхнего упругих ограничителей вертикальных перемещений стрелы. Дополнительно в электрическую схему секции был введен блок питания электродвигателя вибропривода, включающий: понижающий трансформатор, выпрямитель, потенциометр и вольтметр.

Без каких-либо изменений остались следующие узлы промышленной распиловочной секции: ее основание, шпиндельный узел, включающий пару передних стоек, в которых устанавливается шпиндель с закрепленным на нем отрезным (распиловочным) дис-

ком; привод вращения шпинделя, состоящий из электродвигателя и плоскоременной передачи, стрела распиловочной секции с узлом противовеса и узлом крепления и ориентации заготовки. На рисунке 4.54 приведена фотография модернизированной распиловочной секции.

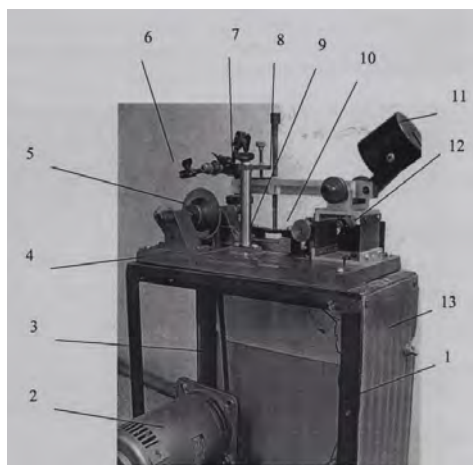


Рис. 4.54. Модернизированная распиловочная секция со снятой боковой обшивкой:

- 1 – корпус; 2 – электродвигатель; 3 – плоский ремень;
- 4 – основание распиловочной секции; 5 – шпиндельный узел; 6 – устройство закрепления заготовки; 7 – узел верхнего ограничителя; 8 – стрела; 9 – узел нижнего ограничителя; 10 – узел привода вращения эксцентриситета;
- 11 – противовес; 12 – узел качания стрелы

Корпус секции выполнен в виде сварной (из стальных уголков) конструкции 1, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда. С боковых сторон корпус закрыт листами 13 из жести. На верхней части корпуса закреплено основание 4 распиловочной секции, на котором смонтированы все ее узлы: в частности, шпиндельный узел 5, стрела 8 с устройством закрепления и ориентации заготовки 6 и противовесом 11 на ее другом конце; узел качания стрелы 12, установленный на плоских пружинах; узел привода вращения эксцентрика 10; узел нижнего 9 и верхнего 7 ограничителей вертикального перемещения стрелы. Внутри корпуса размещен электродвигатель 2 привода вращения шпинделя и плоский ремень 3 для передачи по-

следнему вращательного движения. Ниже приведены основные технические характеристики изготовленной распиловочной секции.

Таблица 4.8 – Технические характеристики модернизированной распиловочной секции

Техническая характеристика	Значение
Напряжение питания	220 В
Частота вращения шпинделя	7000 – 7500 мин ⁻¹
Диапазон изменения статического усилия прижатия заготовки к отрезному диску	0 – 3,2 Н
Амплитуда колебаний, сообщаемых узлу качания стрелы	3,5 мм
Габаритные размеры, длина × высота × ширина	370 мм × 855 мм × 280мм
Масса секции	30 кг

Проведенные предварительные испытания показали, что созданный опытный образец модернизированной распиловочной секции является работоспособным. Он позволяет выполнять операцию распиливания как в обычных условиях, так и при сообщении заготовке управляемого циркуляционного движения.

Важно подчеркнуть то обстоятельство, что осуществление операции на модернизированной распиловочной секции включает все те же основные действия рабочего-распиловщика, как и при распиливании на промышленной секции. Единственное отличие состоит в том, что в ходе распиливания заготовки за счет включения привода вращения эксцентрика ей сообщается управляемое циркуляционное движение, в результате чего реализуется ударно-фрикционный режим ее взаимодействия с отрезным диском, обеспечивающий повышение производительности выполнения операции и качества ее обработанных поверхностей.

4.4.2. Особенности выполнения технологической операции механического распиливания хрупких неметаллических материалов

Следует подчеркнуть, что операция распиливания исходного сырья из таких материалов, независимо от способа ее выполнения, включает в себя последовательное осуществление основных переходов. На первом (врезание) производится врезание режущей кромки диска (инструмента) в материал заготовки на небольшую глубину с целью придания необходимого направления инструменту, обеспечивающего совпадение плоскости распиливания с линиями разметки на заготовке (кристалле). Выполняется оно при малой величине статического усилия прижатия заготовки к режущей кромке диска. К примеру [14], при распиливании кристаллов алмаза на этом переходе применяется специальный диск, имеющий незначительную величину (1,5–2 мм) свободного вылета полотна между зажимными фланцами, что придает ему большую жесткость и устойчивость к деформации продольного изгиба.

По завершении данного перехода этот диск заменяется на распиловочный, у которого величина свободного вылета полотна составляет 15–20 мм, что позволяет осуществлять распиливание кристалла на всю необходимую для его разделения глубину. Этому соответствует начало второго перехода – основного распиливания, которое выполняется с постепенным увеличением статического усилия прижатия кристалла к диску, вплоть до его максимально допустимого значения, соответствующего возникновению деформации продольного изгиба распиловочного диска.

На заключительном переходе – окончании распиливания, началу которого соответствует глубина пропила заготовки (кристалла) порядка 85–90 % от общей, величина статического усилия прижатия ее к инструменту плавно снижается вплоть до нуля на стадии окончательного разделения кристалла на части. Такой режим выполнения заключительного перехода способствует предотвращению откалывания частей кристалла с образованием на их распиленных поверхностях крайне нежелательных дефектов в виде сколов и ступенек.

Как уже отмечалось, аналогичным образом изменяется величина врезной подачи в процессе распиливания исходных заготовок из хрупких неметаллических материалов с использованием других способов выполнения операции. В качестве примера на рисунке 1.7 представлен рекомендуемый график изменения величины подачи Q при отрезании пластин кремния диаметром 100 мм с помощью алмазного отрезного круга с внутренней режущей кромкой [5].

Как видно (рисунок 1.7), в начале выполнения операции, т.е. на переходе «врезание», величина подачи составляет порядка 13–15 мм/мин, которая по мере заглубления диска в слиток постепенно увеличивается, достигая максимального значения (50–52 мм/мин) при распиливании слитка до половины его диаметра. После этого значение Q плавно снижают, а на завершающем этапе разделения пластины величина подачи составляет 5–6 мм/мин. Необходимости такого регулирования подачи в процессе выполнения операции распиливания обусловлена появлением сколов обрабатываемого материала. Сколы пластин чаще всего происходят во время врезания круга (инструмента) в слиток (заготовку) и окончания реза. Это объясняется повышенными вибрациями круга, которые в недостаточной мере ограничивают стенки прорезаемой в слитке канавки. К тому же при малой дуге контакта режущей кромки и слитка на каждое алмазное зерно приходится большая нагрузка, которая может скалывать пластину или же способствовать образованию большой глубины нарушенного слоя в зонах врезания круга и его выхода из слитка. Для того чтобы предотвратить сколы пластин и выровнять глубину нарушенного слоя по всей поверхности пластины, регулируют подачу в процессе отрезания каждой пластины. Аналогичным образом поступают при выполнении операции распиливания с использованием ленточного инструмента, штрипс и проволоки [5, 6].

4.4.3. Определение рациональных режимов выполнения операции механического распиливания хрупких неметаллических материалов с циркуляционным движением заготовки

Очевидно, операция распиливания с использованием циркуляционного движения заготовки также должна включать указанные пе-

реходы, но в отличие от ее традиционного выполнения, когда условия их проведения определяются только за счет изменения статического усилия прижатия заготовки к диску, в данном случае такая задача может быть решена путем изменения и других параметров режима обработки.

При выборе из них более предпочтительного необходимо учитывать следующие предъявляемые требования. Во-первых, изменение (регулирование) должно обеспечивать целенаправленное и эффективное влияние на параметры траектории циркуляционного движения заготовки, а соответственно на условия ее взаимодействия с диском. Во-вторых, этот параметр режима обработки должен быть простым и удобным с точки зрения его регулирования непосредственно в процессе выполнения операции. Согласно полученным экспериментальным зависимостям, в наибольшей степени указанным требованиям соответствуют такие параметры режима распиливания, как частота возбуждения колебательной системы и величина зазора между стрелой и верхним ограничителем. В свою очередь, из них, с точки зрения простоты и надежности регулирования, предпочтение следует отдать частоте возбуждения колебательной системы, изменение которой легко осуществлять путем варьирования напряжения питания электродвигателя с установленным на его валу эксцентриком. Отсюда следует, что при осуществлении операции с использованием циркуляционного движения заготовки для обеспечения необходимых условий выполнения ее отдельных переходов следует соответствующим образом изменять частоту f возбуждения колебательной системы за счет регулирования напряжения U питания электродвигателя вибропривода. Так, при первом переходе операцию распиливания следует выполнять без возбуждения колебательной системы, т.е. в обычных условиях обработки. С началом второго перехода операции частоту f следует постепенно увеличивать, доводя до максимального его значения, при котором параметры формируемой траектории движения заготовки оказывают наибольшее влияние на интенсивность ее распиливания и качество обработанных поверхностей. По мере приближения к началу третьего перехода операции распиливания частоту f следует плавно снижать, а заключительную стадию разделения заготовки на части, когда необходимо обеспечить низкий уровень силового нагружения системы заготовка – отрезной диск, значение частоты f следует

принимать низким, при котором формируемая траектория эллиптического движения заготовки обеспечивает наименьшую интенсивность ударного взаимодействия элементов системы.

Исходя из рассмотренной последовательности осуществления операции распиливания и обобщенного анализа полученных экспериментальных данных, в таблице 4.9 приведены рациональные значения частоты возбуждения колебательной системы и статической нагрузки, а также соответствующие им параметры эллиптической траектории движения заготовки при ее распиливании на модернизированной секции. Постоянными параметрами режима распиливания приняты: частота вращения диска, равная 7500 мин^{-1} ($V_{\text{кр}} = 27 \text{ м/с}$); амплитуда вынужденных колебаний $A_0 = 3,5 \text{ мм}$; величина зазора $Z = 3 \text{ мм}$.

Таблица 4.9 – Рациональные значения частоты возбуждения колебательной системы и статической нагрузки при распиливании на модернизированной распиловочной секции

Номер и наименование перехода выполнения операции распиливания	f , Гц	$P_{\text{ст.в}}$, Н
1 Начало распиливания (врезание)	0	1,2
2 Основное распиливание	3,6	2,2
3 Окончание распиливания (разделение заготовки на части)	1,7	1,2

В таблице 4.9 указаны диапазоны регулирования частоты возбуждения колебательной системы и статической нагрузки.

В ходе выполнения операции регулирование параметра f осуществляется путем изменения частоты вращения эксцентрика за счет варьирования напряжения U питания электродвигателя вибропривода колебательной системы, согласно предварительно полученной тарировочной зависимости $f(U)$, представленной на рисунке 4.55.

Изменение величины статической нагрузки $P_{\text{ст.в}}$ в процессе выполнения операции осуществляется, как и при распиливании по традиционной технологии: путем изменения угла γ наклона поворотного рычага стрелы с противовесом относительно горизонтали (рисунок 4.1), согласно данным, приведенным в таблице 4.1.

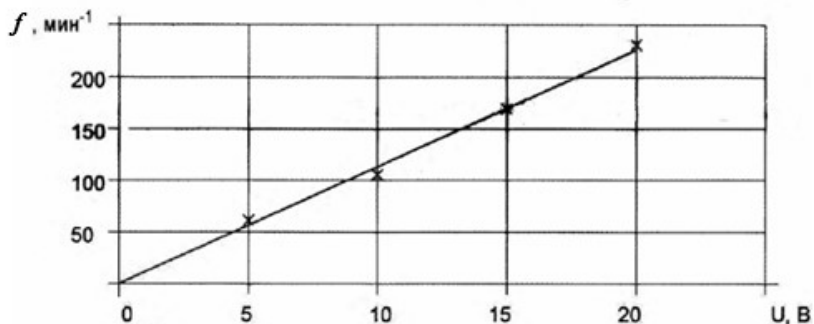


Рис. 4.55. Зависимость частоты вращения эксцентрика f от напряжения U питания электродвигателя вибропривода колебательной системы

На основании установленных рациональных режимов операции распиливания с использованием управляемого циркуляционного движения заготовки была определена последовательность осуществления данной операции с описанием содержания ее отдельных переходов.

4.4.4. Последовательность и содержание технологических переходов выполнения операции механического распиливания хрупких неметаллических материалов с использованием модернизированной распиловочной секции

Как отмечалось ранее, при выполнении операции распиливания на модернизированной распиловочной секции все ее вспомогательные переходы остаются такими же, как и при использовании традиционной технологии. В частности, это закрепление заготовки на оправке и установка оправки на рабочем конце стрелы; установка в шпинделе отрезного (распиловочного) диска; требуемая ориентация заготовки относительно режущей кромки последнего; раскрепление оправки с полуфабрикатом после окончания операции распиливания и его извлечение из оправки. Поэтому содержание этих вспомогательных переходов можно не приводить, а остановиться на выполнении технологических переходов, последовательность осуществления которых приведена ниже.

4.4.4.1. Установить рычаг противовеса стрелы в положение, соответствующее значению $P_{ст.в} = 1,2 \text{ Н}$ ($\gamma = 60^\circ$).

4.4.4.2. Путем плавного выворачивания опорного винта стрелы подвести заготовку до касания с торцевой (режущей) поверхностью отрезного диска.

4.4.4.3. С помощью регулировочного винта верхнего ограничителя установить зазор Z между ним и стрелой равный $2,5 - 3,0 \text{ мм}$.

4.4.4.4. Ввернуть опорный винт стрелы таким образом, чтобы между заготовкой и диском образовался зазор $1,5 - 2,0 \text{ мм}$.

4.4.4.5. Включить привод вращения отрезного диска.

4.4.4.6. Плавно выворачивая опорный винт стрелы осуществить начало врезания заготовки в диск, после чего включить электродвигатель вибропривода.

4.4.4.7. При достижении глубины пропила $1,0 - 1,5 \text{ мм}$ повысить напряжение U до 20 В ($f = 3,6 \text{ Гц}$) и одновременно увеличить $P_{ст.в}$ до $2,2 \text{ Н}$ ($\gamma = 50^\circ$).

4.4.4.8. При достижении глубины пропила $80 - 90 \%$ от общей, снизить U до 10 В ($f = 1,7 \text{ Гц}$) и $P_{ст}$ до $1,2 \text{ Н}$ ($\gamma = 60^\circ$).

Представленная последовательность выполнения операции механического распиливания и приведенное описание выполнения ее переходов в принципе представляют собой операционную технологию механического распиливания хрупких неметаллических материалов на модернизированной распиловочной секции с циркуляционным движением заготовки.

4.4.5. Экспериментальная оценка эффективности применения разработанной технологии механического распиливания хрупких неметаллических материалов с использованием модернизированной распиловочной секции

С использованием модернизированной распиловочной секции и установленных рациональных режимов обработки были проведены опытно-промышленные испытания разработанной технологии по распиливанию заготовок из различных материалов, предоставленных заинтересованными организациями. В частности, заготовки из шпинели, александрита и сапфира были предоставлены НП ООО «Соликс»; образцы из фианита предоставлены ООО «Фа-

цет»; образцы из карбида кремния предоставлены ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Распиливание заготовок осуществлялось в одном случае по традиционной технологии с изменением значения только статической нагрузки $P_{ст}$, а во-втором – по разработанной технологии с использованием рациональных режимов обработки.

В качестве инструмента использовали стальной отрезной диск диаметром 72 мм с алмазосодержащим покрытием из микропорошка 60/40, частота его вращения составила 7500 мин^{-1} , СОЖ не применялось.

Продолжительность распиливания образцов t определялась по показаниям секундомера, который запускался при начале процесса распиливания и останавливался в момент разделения образца на части. Интенсивность распиливания i ($\text{мм}^2/\text{мин}$) определялась отношением t/F , где F – площадь распиленной поверхности образца. Было проведено пять распилов образцов по традиционной технологии и пять – по разработанной. За окончательные значения t , R_a и i были приняты средние арифметические значения указанных параметров.

После распиливания исходных заготовок на полуфабрикаты исследовалось качество их обработанных поверхностей. В частности, с помощью профилометра-профилографа фирмы Taylor Hobson измеряли их шероховатость в направлении, совпадающем с движением гравитационной подачи. Состояние топографии распиленной поверхности визуально оценивалось по полученным с помощью микроскопа, оснащенного цифровой камерой, фотографиям.

Получены соответствующие акты проведенных испытаний, а их результаты в обобщенном виде представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты опытно-промышленных испытаний разработанной технологии по распиливанию заготовок из различных материалов

Материал заготовки	Твердость по шкале Мооса	Значение отношения i_1/i_0	Значение отношения R_{a1}/R_{a0}
Шпинель	8,0	1,25	1,10

Материал заготовки	Твердость по шкале Мооса	Значение отношения i_1/i_0	Значение отношения R_{a1}/R_{a0}
Фианит	8,0	1,46	2,27
Александрит	8,5	1,23	1,17
Сапфир	9,0	3,67	1,74
Карбид кремния	9,1–9,5	1,80	2,41

Из сравнительного анализа полученных данных следует, что во всех случаях использование разработанной технологии позволяет в сравнении с традиционной повысить интенсивность процесса распиливания указанных материалов и одновременно снизить значение высотного параметра R_a шероховатости поверхности распиленных полуфабрикатов [151, 160–162]. При этом, в общем, с повышением твердости обрабатываемого материала эффективность применения разработанной технологии возрастает, некоторый разброс значений отношения i_1/i_0 и R_{a1}/R_{a0} обусловлен анизотропией физических свойств минералов.

Так, при распиливании шпинеля и фианита (8 единиц твердости) интенсивность процесса возросла в 1,25–1,46 раза, а значение параметра R_a снизилось в 1,10–2,27 раза. При распиливании сапфира и карбида кремния (9 и более единиц твердости) интенсивность процесса возросла в 1,80–3,67 раза, а значение параметра R_a снизилось в 1,74–2,41 раза.

Список использованных источников

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : учеб. пособие : в 2 т. / Б. А. Артамонов [и др.] ; под ред. В. П. Смоленцева. – М. : Высш. шк., 1983. – Т. 2 : Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии. – 208 с.
2. Житников, В. П. Импульсная электрохимическая размерная обработка / В. П. Житников, А. Н. Зайцев. – М. : Машиностроение, 2008. – 413 с.
3. Киселев, М. Г. Электрофизические и электрохимические способы обработки материалов : учеб. пособие / М. Г. Киселев, Ж. А. Мрочек, А. В. Дроздов. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2014. – 389 с.
4. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.] ; под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Политехника, 2004. – 679 с.
5. Запорожский, В. П. Обработка полупроводниковых материалов / В. П. Запорожский, Б. А. Лапшинов. – М. : Высш. шк., 1988. – 184 с.
6. Захаров, А. А. Физико-химические основы размерной обработки полупроводников. Механическая обработка : учеб. пособие / А. А. Захаров, В. А. Юзова. – Красноярск : Изд-во Кранояр. гос. техн. ун-та, 1997. – 215 с.
7. Технология деталей радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие / С. Е. Ушакова [и др.] ; под ред. С. Е. Ушаковой. – М. : Радио и связь, 1986. – 254 с.
8. Алмазная штрипсовая пила для резки камня : а. с. 606730 / А. А. Коробейников, А. М. Шкредов, Ю. И. Сычев, В. Н. Селуянов. – Опубл. 15.05.1978.
9. RU 83210 U1 Алмазный инструмент, 2008
10. RU 70192 U1 Пильная струна, 2007
11. Ru 2545956 U1 Способ изготовления алмазно-абразивной проволоки, 2012
12. RU 156041 U1 Абразивная проволока, 2015
13. Шелег, В. К. Повышение эффективности использования монокристаллического кремния при резке слитков на пластины /

В. К. Шелег, А. Е. Корзун, С. Э. Крайко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 20–25.

14. Епифанов, В. И. Технология обработки алмазов в бриллианты : учебник / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков ; под ред. В. И. Епифанова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1987. – 335 с.

15. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. – М.: Наука, 1973. – 254 с.

16. Природные и синтетические алмазы/Г.Б. Бокий, Г.Н. Безруков Ю.А. Клюев и др. – М.: Высш. шк., 1986. – 246 с.

17. Алмазы / Д.В. Федосеев, Н.В. Новиков, А.С. Вишнеvский, И.Г. Теремецкая. – Киев: Наукова думка, 1981. – 311 с.

18. Ферсман А. Е. Кристаллография алмаза. – М.: Наука, 1955. – 287 с.

19. Киселев, М. Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов ; под ред. М. Г. Киселева. – Минск : Тесей, 2001. – 344 с.

20. Несмелов А.Ф., Завьялова С.С. Влияние карбонизации поверхности на износ алмазного инструмента // Сб. тр. ВНИИГознака. – 1967. – № 5. – С. 241–257.

21. Скотт Г. Экспериментальная оценка возможности термической обработки кристаллов алмаза // Новые работы по трению и износу. – М., 1959. – С. 78–84.

22. Сил М. Обработка кристаллов алмаза с помощью нешаржированного инструмента// Новые работы по трению и износу. – М., 1959. – С. 252–256.

23. Сил М. Износ кристаллов алмаза при безабразивной обработке // Докл. АН СССР. – 1959. – Т. 145, № 3. – С. 66–67.

24. Богомоллов И.И. Возрастание интенсивности огранки алмаза за счет увеличения температуры рабочего инструмента // Тр. ВНИИМАНШ. – М., 1955. – № 1. – С. 75–79.

25. Wilks J. Cathodoluminescence in deformed diamond // J. Nature. – 1972. – N 239(5372). – P. 15–18.

26. Анализ механизма изнашивания алмаза / А.А. Аптекман, О.В. Бакун, О.Н. Григорьев, В.И. Трефилов. / Докл. АН СССР. – 1986. – Т. 290, № 4. – С. 845–848.

27. Оценка механического разрушения монокристаллов алмаза / В.И. Трефилов, В.А. Борисенко, Ю.В. Мильман, О.Н. Григорьев // Докл. АН СССР. – 1974. – Т. 217, № 3. – С. 550–553.

28. Аптекман А.А., Деледивка В.П. Исследование процесса разрушения алмаза при его механической обработке // Состояние и перспективы развития бриллиантового производства на 1981–1985 гг.– М., 1981.– С. 52–55.

29. Diamond–graphite equilibrium line from growth and graphitization of diamond. F.P. Bundy, H.P. Bovenkerk, H.M. Strong, R.H. Wentorf // J. Chem. Phys.– 1961.– Vol. 35, N 2.– P. 1144–1149.

30. Лоладзе Т.Н., Бокучава Г. В. Износ алмазов и алмазных кругов.– М.: Наука, 1967.– 214 с.

31. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел.– М.: Машиностроение, 1968.– 186 с.

32. Круглов Г.А., Тарасевич И.К. Пути интенсификации обработки алмазов // Синтетические алмазы–ключ к техническому прогрессу: Материалы межд. научн.-техн. конф., ., в двух частях. Ч.2 – Киев, 1977.– С. 132–136.

33. Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Обработка машиностроительных материалов алмазным инструментом.– М.: Наука, 1966.– 152 с

34. Семенов А.П., Поздняков В.В., Крапошина Л.Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами.– М.: Наука, 1974.– 112 с.

35. Ардамацкий А.Л. Алмазная обработка оптических деталей.– Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1978.– 232 с.

36. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения.– М.: Машиностроение, 1963.– 204 с.

37. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах.– Киев: Наукова думка, 1979.– 155 с.

38. Крагельский И.В. Трение и износ.– М.: Наука, 1968.– 358 с.

39. Мишнаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов.– Киев: Наукова думка, 1982.– 72 с.

40. Рогов В.В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей.– Киев: Наукова думка, 1985.– 147 с.

41. Сагарда А.А., Чеповецкий И.Х., Мишнаевский Л.Л. Алмазно-абразивная обработка деталей машин.– Киев: Наукова думка, 1974.– 212 с.

42. Филимонов Л.И. Высокоскоростное шлифование.– Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1979.– 144 с.

43. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание.– М.: Наука, 1970.– 323 с.

44. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей.– М.: Машиностроение, 1979.– 181 с.
45. Rewick R., Wentreck P.R., Wise H. Carbon gasification in the presence of metal catalysts //Fuel.– 1974.– Vol. 53, №4.– P. 274–279.
46. Григорьев А.П., Лифшиц С. У., Шамаев П.П. Механизм гидрирования углерода в присутствии никеля, железа и платины // Кинетика и катализ.– 1977.– Т. 18, №4. –С.948–952.
47. Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента.– М.: Машиностроение, 1958.– 117 с.
48. Nishiyama Y., Tamai Y. Deposition of carbon and its hydrogenation catalyzed by nickel //Carbon.– 1976.– Vol. 14.– P. 13–17.
49. Figueiredo J.L., Triiwn D.L. Gasification of carbon deposits on nickel catalysts //J. Catalysis.– 1975.– Vol. 40.– P. 154–159.
50. Кирилин В.Н.// Обработка машиностроительных материалов алмазным инструментом.– М.: Машиностроение, 1966.– 152 с.
51. Исследование механизма разрушения алмаза при абразивной обработке / О.Н. Григорьев, Ю.В. Мильман, В.И. Трофимов и др. // Синтетические алмазы.– 1972.– №2.– С. 9-11.
52. Влияние температуры в зоне обработки на разрушение алмаза при его распиливании / Л.Ф. Верещагин, А.А. Симерчан, Т.Г. Ганкевич и др. // Синтетические алмазы.– 1979.– Вып. 4.– С. 3–5.
53. Знаменский Г.Н., Цисарь И.А. Разрушение алмаза в процессе распиливания // Алмазы и сверхтвердые материалы.– 1983.– Вып. 12.– С.7.
54. Микрогеометрия поверхности при распиливании кристаллов природного алмаза / Дорожкин Н.Н., Епифанов В.И., Кононенко В.И. // Синтетические алмазы.– 1972.– №5.– С. 19-21.
55. А.с. 1770134 СССР, МКИ В24В 11/02. Устройство для резки твердых и хрупких материалов / Л.В. Худобин, М.А. Белов, О.Г. Крупенников, А.А. Федотов (СССР).– № 3360584/24–08; Заявлено 14.02.90; Оpubл. 04.07.92, Бюл. № 39 // Открытия. Изобретения.– 1992.– № 39.– С.34.
56. А.с. 1705095 СССР, МКИ В24В 11/02. Способ резки твердых и хрупких материалов / Л.В. Худобин, М.А. Белов, О.Г. Крупенников (СССР).– № 3359874/24–08; Заявлено 25.11.89; Оpubл. 15.01.92, Бюл. № 2 // Открытия. Изобретения.– 1992.– № 2.– С.58.

57. Третьяков И. П., Абилов Р.А. Оценка влияния состава и физических свойств связки на режущую способность распиловочных дисков // Алмазы.– 1968.– № 3.– С. 10–12.

58. Изнашивание монокристаллов алмаза / А.М. Бочаров, А.Ф. Климович, А.С. Старовойтов, В.В. Снежков.– Минск.: Белорусская наука, 1996.– 144 с.

59. Svec G A.// Lapid. Jour. (USA). 1975. P. 1848–1855.

60. Svec G. A. // нп. Jour. (USA). 1975, P. 564–568.

61. Савицкий С.С. Разработка способа и технологии шаржирования распиловочных дисков с применением ультразвука: Автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.03.01 / БПИ.– Минск, 1986.– 19 с.

62. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков путем их ультразвуковой обработки / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, С.С. Савицкий, и др. // Алмазы и сверхтвердые материалы.– 1983.– № 12.– С. 5–6.

63. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, И.А.Касьяненко // Порошковая металлургия.– 1998.– Вып. 21.– С. 23–26.

64. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании.– Горький: Правда, 1975.– 425 с.

65. Бобровский В.А. Электродиффузионный износ инструмента.– М.: Машиностроение, 1970.– 357 с.

66. Прейс Г.А., Сологуб Н.А., Портер А.И. Влияние свойств материала связки абразивного слоя распиловочного диска на электрофизические явления в зоне распиливания // Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия. Тез. докл. всесоюз. конф., Киев 15–18 апр. 1973 г. / Ин-т физики тв. тв. ла.– Киев, 1973.– С. 117.

67. Экспериментальная оценка величины тока электризации, протекающего в зоне обработки на интенсивность распиливания монокристаллов алмаза / А.М. Бочаров, П.В. Сысоев, В.С. Миронов, А.Ф. Климович // Алмазы и сверхтвердые материалы.– 1983.– Вып. 3.– С. 1–2.

68. Миронов В.С., Бочаров А.М., Климович А.Ф. Повышение производительности процесса механического распиливания монокристаллов алмаза путем использования явление электризации зоны обработки // Сверхтвердые материалы.– 1985.– Вып. 3.– С. 61–64.

69. Бушмелев А.С. Повышение производительности и качества обработки цилиндрических поверхностей изделий из монокристаллов алмаза: Дис. ... канд. техн. наук. 05.03.01.– М., 1983.– 213 с.

70. Евдокимов Ю.А., Санчес С.С. Исследование процессов диффузии и фрикционного переноса при динамическом взаимодействии твердых тел // Электрохимические процессы при трении и использование их для борьбы с износом: Тез. докл. всесоюз. конф. Одесса, 24–28 июня 1973 г. / Одесский политехн. ин-т.– Одесса, 1973.– С. 147–149.

71. Евдокимов Ю.А., Санчес С.С., Сухоруков Н.Л. Оценка влияния явления трибоэлектризации алмаза на производительность его обработки // Механика полимеров.– 1973.– Вып. 3.– С. 520–525.

72. Клементьев Н.М. Термодинамика трения.– Воронеж: Типография ВГУ, 1971.– 278 с.

73. Коробов Ю.М., Лрейс Г.А. Электромеханический износ при трении и резании металлов.– Киев: Наукова думка, 1976.– 145 с.

74. Разумовский А. Г., Галькевич Г. В. Исследование возможности изготовления алмазного инструмента термическим напылением.– Смоленск: Типография им. Смирнова, 1981.– 87 с.

75. А. с. 1104769 СССР, МКИ В24В 11/02. Способ обработки кристаллов / А.М. Бочаров, В.С. Миронов, П.В. Сысоев, (СССР).– № 4578981/24–08; Заявлено 08.04.83; Оpubл. 04.02.84, Бюл. № 51 // Открытия. Изобретения.– 1984.– № 51.– С.12.

76. А. с. 1027982 СССР, МКИ В24В 11/02. Инструмент для обработки природных кристаллов / В.С. Миронов, А.М. Бочаров, А.Ф. Климович (СССР).– № 4147756/24–08; Заявлено 13.09.82; Оpubл. 21.09.83, Бюл. № 38 // Открытия. Изобретения.– 1983.– № 38.– С.27.

77. А. с. 947168 СССР, МКИ В24В 11/02. Материал для абразивного инструмента / В.С. Миронов, А.Ф. Климович (СССР).– № 3874561/24–08; Заявлено 21.01.82; Оpubл. 15.12.82, Бюл. № 12 // Открытия. Изобретения.– 1982.– № 12.– С.27.

78. Климович А. Ф., Миронов В. С. Влияние величины тока электризации при распиливании кристаллов алмаза на основные показатели процесса распиливания // Трение и износ.– 1981.– Т. 2, № 4.– С. 713–718.

79. Станок для распиливания кристаллов алмаза : пат. RU 30109 / Ю. Н. Ребрик, М. А. Шкадов, В. Н. Абрамов, Ю. И. Кутько,

Ю. А. Деверилин, А. С. Максимович, Ю. Х. Алексеев, В. П. Гурьев, С. Г. Новик. – Оpubл. 20.06.2003.

80. Головка автоматическая для распиливания кристаллов : пат. RU 2013207 / С. М. Иванов, А. М. Бочаров, И. С. Вицинский, Т. И. Ламыкина, С. Н. Антонов, А. В. Терещенко. – Оpubл. 30.05.1994.

81. Устройство для распиливания кристалла : пат. RU 2148495 / А. А. Попов, В. Я. Ральков. – Оpubл. 10.05.2000.

82. Марков, А. И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А. И. Марков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 365 с.

83. Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов / А. И. Марков. – М. : Машиностроение, 1980. – 237 с.

84. Кумабэ, Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ ; пер с яп. С. Л. Масленникова ; под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.

85. Киселев, М. Г. Электрофизические и электрохимические способы обработки материалов: Учебное пособие / М.Г. Киселев, Ж.А. Мрочек, А.В. Дроздов Минск: «Новое знание», Москва:«ИНФРА-М», 2013. 389 с.

86. Галенюк Г.А. Влияние ультразвуковых колебаний на температуру в зоне резания при распиливании кристаллов алмаза// Металлология и приборостроение.- 1998.- Вып. 1.- С.16- 18.

87. Киселев М.Г., Гончаров В.К., Минченя В.Т., Пузырев М.В. Повышение эксплуатационных показателей режущего инструмента для распиливания кристаллов алмаза // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. №5. С. 1002- 1005.

88. Северденко В. П., Скрипниченко А. Л., Тявловский М. Д. Ультразвук и прочность. Мн.: Наука и техника, 1979. 214с.

89. Марков А. И. Влияние ультразвуковых колебаний на пластическую деформацию и трение при обработке металлов: Пятая Всесоюз. науч.-техн. конф. по ультразвуковым методам интенсификации технолог, процессов. М. 1983. С.74-75.

90. Коновалов Е. Г., Костюкович С. С., Киселев М. Г. Влияние ультразвуковых колебаний на снижение силы трения при начале движения // ДАН БССР. 1972. Т. 16. № 12. С. 1110-1112.

91. Северденко В. П., Степаненко А. В., Заяш И. В. Влияние ультразвуковых колебаний различного направления на контактное трение//ДАН БССР. 1969. Т. 13. № 10. С. 907-910.

92. Бабицкий, В. И. Теория виброударных систем: приближенные методы / В. И. Бабицкий. – М. : Наука, 1978. – 352 с.

93. Казанцев В. Ф. Зависимость напряжения в материале при ультразвуковой обработке от амплитуды колебаний и силы прижима// Акуст. журн. 1963. Т. 11.№ 1. С. 19-21.

94. Коновалов Е. Г., Раптунович А. И., Басенок Г. С. Уменьшение динамического трения при введении ультразвуковых колебаний // ВесціАН БССР. 1971. №3.С. 52-54.

95. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 640 с.

96. Партон, В. З. Динамическая механика разрушения / В. З. Партон, В. Г. Борисковский. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.

97. Киселев М.Г., Ибрагимов В.А. Математическое моделирование процесса контактного взаимодействия тел в условиях ультразвукового нагружения // Приборостроение.– 1989.– №11.– С.98–102.

98. Киселев М.Г., Минченя В.Т., Галенюк Г.А. Влияние ультразвуковых колебаний на снижение сил сопротивления в процессе механического распиливания хрупких материалов. - Рефераты докладов международной научно - технической конференции. В 2-х томах. Том I/ Под редакцией Б.М. Хрусталева - Мн.: УП «Технопринт», 2003. - с. 98.

99. Марков А.И. О механизме воздействия ультразвуковых колебаний на процессы пластической деформации и разрушения// Ультразвук в машиностроении. М.: ЦНИИПИ, 1966. С. 45-54.

100. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 213 с.

101. Семенова В. А. О физической природе внешнего трения в условиях гармонических колебаний ползуна в пределах предварительного смещения//Изв. вузов, Машиностроение,1962, №2. С. 38-43.

102. Улегин В.Г. Эффективность и качество обработки алмазных инструментов и алмаза шаржируемыми чугунами дисками// Алмазы и сверхтвердые материалы. 1981. №2. С. 12.

103. Быховский, И. И. Основы теории вибрационной техники / И. И. Быховский. – М. : Машиностроение, 1969. – 363 с.

104. Отопков Л.П., Ножкина А.В. Разработка новых высокопроизводительных процессов обработки монокристаллов алмаза (распиливания, подшлифовки и огранки) на основе химического взаимодействия алмаза с растворителями.– М.: Наука, 1977.– 118 с.

105. М.Г.Киселев, В.Т.Минченя, Г.А.Галенюк. Устройство для обработки кристаллов алмаза. Патент Республики Беларусь N1447 от 28.01.1996 г.

106. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224с.

107. Шамаев П. П., Ботвин В. В., Лифшиц С. Х. Об эффективности использования термохимических методов обработки алмазов при производстве бриллиантов Состояние и перспективы развития алмазообрабатывающего производства в 12- 13 пятилетках. Смоленск, 1989. СЮ-31.

108. Киселев, М. Г. Вибродарные акустические системы в технологии шаржирования поверхностей / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Степаненко. Минск, Изд-во БНТУ, 2013. 586 с.

109. Гладков С.Н. Электромеханические вибраторы.– М.: Машиностроение, 1966.– 141 с.

110. Отделочно-абразивные методы обработки: Справ. пособие / Л.М. Кожуро, А.А. Панов, Э.Б. Пономарева, П.С. Чистосердов; Под общ. ред. П.С. Чистосердова.–Минск: Выш. шк., 1983.– 287 с.

111. Ковалев Л.Д. Приборы для измерения линейных и угловых величин: Учебно.-метод. пособие / Л.Д. Ковалев, С.Н. Суровой.– Минск: БГПА, 2000.– 183 с.

112. Сычев Ю.И. Оборудование для распиловки камня: Учебное пособие для проф.-техн. училищ.– Л.: Стройиздат, Ленингр. Отдние, 1983.– 288 с.

113. Дьяченко Л.Е., Мизрохин Ю.Н. Ультразвуковое резание алмазов.– М. ГОСИНТИ, №6-66-528/143, 1966.– 5 с.

114. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями.– М.: Машиностроение, 1970.– 351 с.

115. Бабицкий В.И., Ковалев А.С., Крупенин В.Л. Исследование квазиконсервативных систем методом усреднения // Изв. АН СССР, МТТ.-1982.-№1-С.41-50.

116. Теоретическая оценка степени влияния ультразвука на повышение производительности процесса механического распиливания монокристаллов сверхтвердых материалов / М.Г. Киселев, Г.А. Галенюк, А.В. Дроздов // Весці. НАН Беларусі.– 2004.– №2.– С. 55–59.

117. Епифанов В.И. Влияние вибраций станка на процесс распиливания алмазов // Алмазы и сверхтвердые материалы.– 1974.– №9.– С. 7–11.

118. Ультразвук / Под ред. И.П. Голяминой.– М.: Сов. энцикл., 1979.– 400 с.

119. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Словеснов А.С. Повышение режущей способности распиловочных дисков путем применения виброударного режима обработки// Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы докладов 6-й Межд. научн.-техн. конф.– Минск, 2004.– С. 301–303.

120. Марков А.И. Испытание внедрением и царапаньем при ультразвуковых колебаниях индентора // Склерометрия: Сб.– М.: Наука, 1968.– С. 183–192.

121. Шлифование металлов / Под. ред. Л.М. Кожуро.–Минск: Дизайн ПРО, 2000.– 352 с.

122. Киселев М.Г., Дроздов А.В. Особенности формирования шероховатости обработанной поверхности при виброударном распиливании хрупких материалов// Весці Акад. Навук Беларусі. Сер.фізика-тэхнічных навук.– 2004.– № 4.– С. 67–70.

123. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Словеснов А.С. Влияние низкочастотного виброударного режима на качество поверхности твердых материалов при распиливании: Машиностроение: Респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 20, в двух томах. Т.2 / Под ред. И. П. Филонова.– Минск: УП «Технопринт», 2004.– С. 53–58.

124. Гаркунов Д.Н. Триботехника.– М.: Наука, 1989.– 245 с.

125. Лозовский В.И. Надежность гидравлических агрегатов.– М.: Машиностроение, 1968.– 301 с.

126. Киселев М.Г., Нифагин В.А., Дроздов А.В. Об одной модели взаимодействия виброакустической системы с жестким основанием// Инженерно-физический журнал.– 2004.– № 1.– С. 20–27.

127. Киселев, М. Г. Обоснование возможности обеспечения циркуляционного колебания заготовки в процессе ее механического распиливания / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Меж-

дународный симпозиум «Перспективные материалы и технологии», 24–26 мая 2011 года : сб. ст. / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2011. – С. 41–43.

128. Киселев, М. Г. Установка для исследования процесса распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке вынужденных колебаний / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Приборостроение – 2010 : материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–12 нояб. 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С. 230–231.

129. Киселев, М. Г. Установка для распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке периодического циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 3–9.

130. Киселев, М. Г. Повышение интенсивности и качества распиливания твердых и сверхтвердых материалов путем сообщения заготовке двумерного циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2011. – № 5. – С. 36–40.

131. Yamnaya, D. The technological scheme of firm and superfirm materials workpieces sawing by transferring periodic circular movement to a workpiece / D. Yamnaya, M. Kiselyov // 7th International conference “New electrical and electronic technologies and their industrial implementation” Zakopane, Poland, 28 June – 1 July, 2011 / Lublin Univ. of Technology ; ed. T. N. Kołtunowicz. – Lublin, 2011. – P. 69.

132. Установка для обработки кристаллов алмаза : пат. ВУ 17134 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. А. Новиков, Д. А. Ямная. – Оpubл. 30.06.2013.

133. Установка для обработки кристаллов алмаза : пат. ВУ 17358 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. А. Новиков, Д. А. Ямная. – Оpubл. 30.08.2013.

134. Киселев, М. Г. Влияние условий возбуждения стрелы распиловочной секции на параметры колебательного движения заготовки / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Материалы, технологии, инструмент. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 78–85.

135. Киселев, М. Г. Особенности силового воздействия режущего инструмента на заготовку, перемещающейся при распиливании по двумерной траектории / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Приборостроение – 2012 : материалы 5-й Междунар.

науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2012 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2012. – С. 295–296.

136. Киселев, М. Г. Определение закономерностей силового нагружения упругого элемента распиловочной секции / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Наука и техника. – 2012. – № 5. – С. 28–32.

137. Бабаков, И. М. Теория колебаний : учеб. пособие / И. М. Бабаков. – Изд. 3-е, стер. – М. : Наука, 1968. – 559 с.

138. Киселев, М. Г. Методика и аппаратные средства определения частоты свободных колебаний стрелы модернизированной распиловочной секции / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1. – С. 126–131.

139. Киселев, М. Г. Методики определения пространственно-временных параметров контактного взаимодействия колеблющейся заготовки с распиловочным диском / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 2. – С. 26–29.

140. Киселев, М. Г. Методики и средства определения пространственных и временных параметров двумерного циркуляционного движения заготовки при ее взаимодействии с распиловочным диском / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1. – С. 87–91.

141. Кобринский, А. А. Двумерные виброударные системы: динамика и устойчивость / А. А. Кобринский, А. Е. Кобринский. – М. : Наука, 1981. – 335 с.

142. Экспериментальная оценка влияния параметров двумерного циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания и качество обработанных поверхностей / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич, Д. А. Ямная // Наука и техника. – 2014. – № 4. – С. 57–64.

143. Киселев, М. Г. Исследование временных и частотных параметров контактного взаимодействия заготовки с распиловочным диском при сообщении ей двумерного периодического циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Приклад. науки. – 2012. – № 3. – С. 102–108.

144. Киселев, М. Г. Влияние сообщаемого заготовке двухмерного колебательного движения на силовые и временные параметры ее контактного взаимодействия с распиловочным диском / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 19–25.

145. Методика и оборудование для измерения момента сил сопротивления, действующего в процессе распиливания твердых и сверхтвердых материалов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. А. Новиков, Д. А. Ямная // Приборостроение – 2011 : материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 319–320.

146. Шуман, В. Мир камня : в 2 т. / В. Шуман ; пер. с нем. Т. Б. Здорик, Л. Г. Фельдмана ; под ред. и с предисл. Е. Я. Киевленко. – М. : Мир, 1986. – Т. 1 : Горные породы и минералы. – 215 с.

147. Шуман, В. Мир камня : в 2 т. / В. Шуман ; пер. с нем. Т. Б. Здорик, Л. Г. Фельдмана ; под ред. Е. Я. Киевленко. – М. : Мир, 1986. – Т. 2 : Драгоценные и поделочные камни / послесл. С. Ф. Ахметова. – 263 с.

148. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения = State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct measurements with multiple observations. Methods of processing the results of observations. Basic principles : ГОСТ 8.207-76 : введ. с 01.01.77 / Гос. ком. СССР по стандартам. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.

149. Киселев, М. Г. Математическое описание двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки при обработке на модернизированной распиловочной секции / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Наука и техника. – 2013. – № 4. – С. 37–43.

150. Математическое описание траектории движения заготовки в процессе ее распиливания с использованием виброударной колебательной системы / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. Л. Габец, Д. А. Ямная // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 2. – С. 64–69.

151. Киселев, М. Г. Влияние циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания и качество обработанной

поверхности / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2015. – Т. 20, № 4. – С. 16–24.

152. Киселев, М. Г. Влияние параметров двухмерного циркуляционного движения распиливаемой заготовки по эллипсообразной траектории на качество обработанной поверхности / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Приборостроение – 2011 : материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 321–322.

153. Кащеев, В. Н. Абразивное разрушение твердых тел / В. Н. Кащеев. – М. : Наука, 1970. – 247 с.

154. Теоретическая оценка влияния параметров циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. Л. Габец, Д. А. Ямная // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Приклад. науки. – 2014. – № 11. – С. 37–43.

155. Курс теоретической механики : учебник / В. И. Дронг [и др.]; под ред. К. С. Колесникова. – 3-е изд., стер. – М. : Изд-во Моск. гос. техн. ун-та, 2005. – 736 с.

156. Теоретическая оценка влияния параметров циркуляционного движения кристалла в процессе его распиливания на условия формирования микрорельефа обработанных поверхностей / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. Л. Габец, Д. А. Ямная // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 2. – С. 8–17.

157. Киселев, М. Г. Теоретическое исследование особенностей взаимодействия поверхностей режущего инструмента и распиливаемой заготовки при ее циркуляционном движении / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Приборостроение – 2014 : материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 нояб. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2014. – С. 317–319.

158. Влияние параметров двухмерного циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания и качество обработанных поверхностей / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Мониц, Д. А. Ямная // Приборостроение – 2014 : материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 нояб. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2014. – С. 315–317.

159. Киселев, М. Г. Экспериментальная оценка эффективности сообщения периодического циркуляционного движения распиливаемой заготовки на интенсивность и качество выполнения операции / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 579–589.

160. Ямная, Д. А. Экспериментальная оценка влияния сообщаемого заготовке периодического циркуляционного движения на интенсивность ее распиливания / Д. А. Ямная, А. В. Дроздов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 28–29 апр. 2011 г. / Гом. гос. техн. ун-т. – Гомель, 2011. – С. 100–103.

161. Ямная, Д. А. Экспериментальные исследования эффективности придания двумерного циркуляционного движения заготовке в процессе распиливания твердых и сверхтвердых материалов / Д. А. Ямная, М. Г. Киселев, А. В. Дроздов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : VI Междунар. науч.-техн. конф., 14–16 сент. 2011 г. : сб. материалов : в 3 кн. / Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – Кн. 2 : Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование инженерии поверхностей. – С. 413–421.

162. Киселев, М. Г. Технология виброударного циркуляционного распиливания хрупких заготовок / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы : материалы Междунар. науч. конф., Витебск, 26–29 сент. 2016 г. / Вит. гос. техн. ун-т. – Витебск, 2016. – С. 203–205.

Научное издание

КИСЕЛЕВ Михаил Григорьевич
ДРОЗДОВ Алексей Владимирович
ЯМНАЯ Дарья Андреевна

**ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСПИЛИВАНИЯ
ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
С ВЫНУЖДЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ЗАГОТОВКИ**

Технический редактор *Е. О. Германович*

Подписано в печать 12.12.2017. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 22,85. Уч.-изд. л. 17,87. Тираж 100. Заказ 1014.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск