

Зотов, Г.А., Швырёв, Ф.А. Подготовка и эксплуатация дереворежущего инструмента. – М.: Лесная промышленность, 1986. – 237 с. 4. Любченко, В.И. Резание древесины и древесных материалов. – М.: Лесная промышленность, 1986. – 292 с.

УДК 621.923

Туромша В.И., Лебедев В.Я., Ивашин А.В.

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПОЛНИТЕЛЯ ОРГАНИЧЕСКОЙ СВЯЗКИ НА ЕЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Белорусский национальный технический университет  
ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»  
Минск, Беларусь*

Процессы алмазного шлифования сверхтвёрдых материалов (СТМ) на основе алмаза и кубического нитрида бора изучены достаточно глубоко. Исследованы вопросы механики микроразрушения обрабатываемых поликристаллов, закономерности процесса износа алмазных зёрен шлифовального круга, динамика явлений, происходящих в зоне резания, влияние технологических параметров на выходные показатели обработки и др. Однако, вопросы разработки алмазного инструмента для обработки СТМ с оптимальными трибологическими характеристиками требуют дополнительного изучения.

Производительность обработки СТМ при алмазном шлифовании можно разделить на два временных интервала (рис. 1).

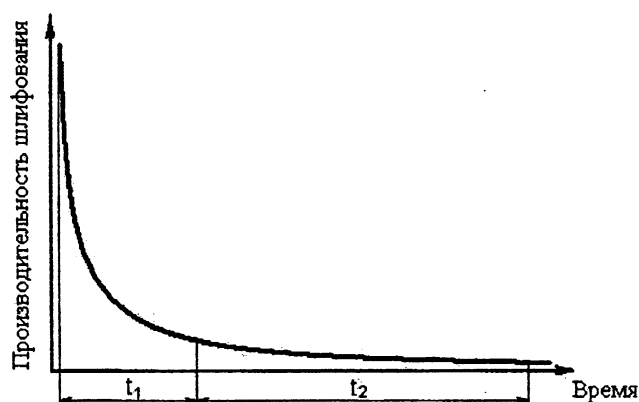


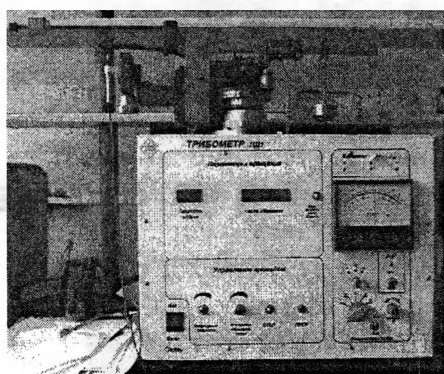
Рисунок 1 - Зависимость производительности шлифования СТМ от времени

В первый период  $t_1$  отмечается наиболее высокая производительность шлифования (объем снимаемого материала в единицу времени): для СТМ на основе кубического нитрида бора –  $6...10 \text{ мм}^3/\text{мин}$ ; для СТМ на основе алмаза –  $0,2...1,2 \text{ мм}^3/\text{мин}$  [1, 2]. В этот период обрабатываемая поверхность формируется в результате хрупкого разрушения путем микровырывов и сколов. Ряд микротрещин, локализованных в границах отдельных кристаллитов, образуется под действие высоких контактных напряжений на обрабатываемой поверхности [3]. Последующие зёрна, «пропахивая» поверхностный слой снимают его, одновременно воздействуя на нижележащий слой. Однако продолжительность данного периода невелика и составляет не более  $1...2$  мин (в зависимости от условий шлифования). В течение этого времени происходит резкое возрастание количества зёрен круга с площадками износа. Следствием этого является значительное увеличение площади контакта, уменьшение

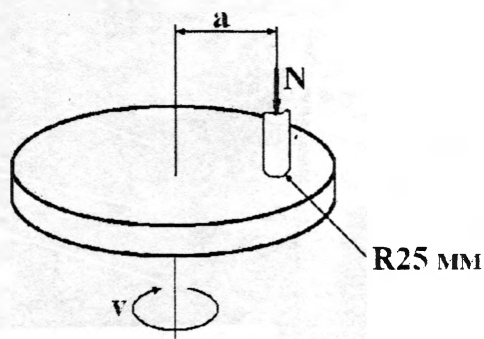
величины удельной динамической нагрузки, что приводит к резкому снижению интенсивности крупного микроразрушения приповерхностных объемов шлифуемого поликристалла.

Второй период шлифования  $t_2$  (периода низкой производительности) может длиться несколько десятков минут. Данный период характеризуется почти полным прекращением съема материала и резким падением интенсивности износа круга. На обрабатываемой поверхности отсутствуют следы обработки, либо просматриваются очень слабо и находятся на значительном расстоянии друг от друга. Процесс резания переходит в процесс трения высокоизносостойкой пары СТМ – алмазные зерна. Также в трении участвует и органическая связка в результате уменьшения выступания алмазных зерен над ее уровнем. Трение связки по обрабатываемой поверхности является одним из источников теплообразования при шлифовании, на интенсивность которого влияют условия шлифования, состав связки и свойства обрабатываемого материала. При этом обрабатываемая поверхность становится более гладкой и покрывается густой сеткой микротрещин, возникающих в результате температурного воздействия. Эти трещины уже не локализируются в пределах отдельных кристаллитов и межкристаллитных границ, а захватывают значительные участки, что приводит к появлению вырывов больших размеров.

Появление таких дефектов при выполнении доводочных и чистовых операций обработки СТМ недопустимо. Для алмазных кругов на органической связке управление рабочим профилем круга в процессе работы невозможно. Как известно такие круги работают в режиме самозатачивания с удовлетворительной производительностью обработки и повышенным расходом алмазов. Снизить теплонапряженность в зоне контакта возможно за счет обеспечения оптимальных трибологических характеристик взаимодействующих материалов. В ранее проводимых исследованиях по определению трибологических параметров изучались известные марки различных связок. В работе [4] определялся коэффициент трения и температура при трении образцов органической связки по твердым сплавам ВК15 и Т15К6 в зависимости от состава наполнителя – карбида бора, железного порошка, электрокорунда белого, сульфата бария и талька. В работе [5] определялся коэффициент трения быстрорежущих сталей, твердых сплавов и минералокерамики по органическим, металлическим и керамическим связкам кругов из СТМ. Подобные исследования для сверхтвердых обрабатываемых материалов не проводились. В настоящее время также ведутся работы по созданию алмазосодержащих композитов, концентрация наполнителей связок в которых отличается от традиционных марок. Поэтому представляет интерес изучение влияния концентрации наполнителей связок на их трибологические характеристики при взаимодействии с обрабатываемым материалом. В связи с этим необходимо исследовать особенности фрикционного контакта и определить коэффициент трения для пары СТМ – органическая связка с различной концентрацией наполнителя.



а)



б)

Рисунок 2 - Общий вид трибометра (а); схема испытаний на трибологическом комплексе (б)

Коэффициент трения определялся на программно-аппаратном комплексе, который создан в физико-техническом институте НАН Беларуси совместно с институтом механики

металлополимерных систем НАН Беларуси на базе трибометра ПД-1 (рис. 2,а). Комплекс позволяет проводить исследования коэффициента трения различных материалов, исследовать процессы контактного взаимодействия (в том числе с введением в зону контакта ПАВ), а так же проводить измерения температуры в зоне контакта. Трибологический контакт осуществляется по схеме торцевого трения "неподвижный палец – вращающийся диск" (рис. 2, б).

Структурная схема трибометра содержит испытательный блок и пульт управления, обеспечивающие возможность оценки фрикционных свойств образцов в широком диапазоне нагрузок и скоростей. Испытательный блок включает в себя следующие функциональные узлы:

- держатели образцов;
- блок датчиков измерения характеристик и параметров трения;
- привод вращения нижнего образца;
- механизм нагружения образцов.

Указанные узлы монтируются на общей станине. Конструкция испытательного блока обеспечивает надежную виброизоляцию машины, при работе в условиях интенсивных динамических нагрузок. Установка испытательного блока производится на изолированную подставку или стол с демпфирующими элементами.

Испытательный блок электрически связан с пультом управления, содержащим:

- блок управления скорости вращения двигателя;
- измеритель количества оборотов и скорости вращения вала;
- систему измерения силы трения;
- аналого-цифровой преобразователь;
- блок защиты от перегрузок.

В данном трибометре пульт управления размещается в одном корпусе с испытательным блоком.

Держатели верхнего 1 и нижнего 2 образцов испытываемых материалов предназначены для формирования пары трения (рис. 3). Они обеспечивают точную и надежную установку образцов, однозначность и определенность в реализации расчетной схемы испытаний, включая равномерность нагрузки и износа образцов. Держатель верхнего неподвижного образца 1 представляет собой цанговый зажим, установленный в каретке 3. Крепление цангового держателя производится гайкой 4. Гайка имеет достаточно широкое осевое отверстие, что позволяет использовать сменные цанговые зажимы для испытания пальчиковых образцов различного диаметра. Каретка устанавливается на траверсе 5 с возможностью перемещения и фиксации вдоль оси траверсы и фиксируется с помощью винта.

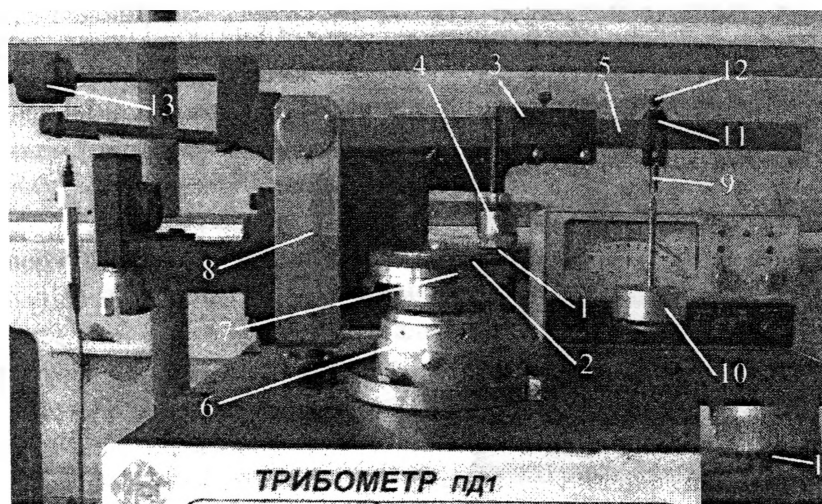


Рисунок 3 – Рабочая зона трибометра ПД-1

Держатель нижнего подвижного образца представляет собой узел, содержащий корпус 6 с прецизионными подшипниками, в которых установлен вал. На одном конце вала

закреплен шкив, а на другом конце имеется опорный цилиндр 7, на который устанавливается образец типа «диск». Крепление образца на опорном цилиндре производится винтами.

Механизм нагружения предназначен для создания нормальной постоянной нагрузки  $N$  на образцы. Для этой цели используется рычажно-гравитационный механизм с пружинным демпфером, обеспечивающий стабильность режима нагружения, независимо от изменения в процессе испытания силы трения и величины износа образцов.

Механизм нагружения состоит из поворотной стойки 8, в которой шарнирно закреплена траверса 5 с держателем образца типа «палец» и пружинный демпфер 9 с чашкой для установки грузов 10. Конструкция механизма нагружения обеспечивает возможность проведения испытаний при изменяемом взаимном положении образцов за счет перемещения и последующей фиксации направляющей каретки 3 в необходимой точке траверсы. Пружинный демпфер с чашкой для установки грузов также имеет возможность перемещаться и фиксировать с помощью винта 12 свое положение в грузовой каретке 11 демпфера вдоль оси траверсы. Поворотная стойка обеспечивает возможность свободного поворота рычага относительно вертикальной оси опоры в результате действия сил трения. Ограничение угла поворота поворотной стойки обеспечивается стальным тросиком, связывающим держатель образца с упругой балкой датчика силы трения.

Для создания малых значений нагрузок траверса оснащена противовесом 13, который уравновешивает рычаг с установленными на нем держателем образцов и нагружающей чашкой с пружинным демпфером. Противовес имеет возможность смещения относительно горизонтальной оси подвеса рычага для корректировки нулевого значения нагрузки при установке держателя образца и нагружающей чашки с пружинным демпфером в соответствии с условиями испытаний. Перемещение противовеса производится путем его вращения по резьбе стержня, установленного на конце траверсы.

Привод вращения нижнего образца предназначен для сообщения вращательного движения со скоростью  $v$  образцу типа «диск». Привод обеспечивает плавность движения без рывков и ударов. Для обеспечения возможности плавного изменения частоты вращения нижнего образца использован двигатель постоянного тока.

Держатели образцов конструктивно связаны с блоком измерения, который состоит из систем измерения силы трения, количества оборотов и скорости вращения нижнего образца. Системы измерения включают в себя датчики, усилители и показывающие приборы. Регистрация значений силы трения проводится на ЭВМ с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя. Специальная программа обрабатывает поступающие сигналы и отображает на дисплее компьютера кинетику изменения коэффициента трения в реальном масштабе времени, а также производит расчет минимального, максимального и среднего значения коэффициента трения.

#### **Исследуемые материалы.**

Верхний образец оснащался сферической вставкой из эльбора-Р радиусом 25 мм. Нижние образцы кольцевой формы с наружным диаметром 90 мм и высотой 6 мм изготавливались из фенолформальдегидной смолы СФП-012А и карбида бора, которые являются основой при изготовлении алмазных кругов на связке В2-01. Составы опытных образцов (в объемных %) приведены в табл. 1. Данные образцы изготавливались методом холодного брикетирования с последующим горячим спеканием в специально разработанной пресс-форме.

Таблица 1 – Составы образцов органических связей (в объемных %)

№ образца	Смола СФП-012А	Карбид бора 5П
1	40	60
2	50	50
3	60	40

На первом этапе в пресс-форму засыпается смесь из карбида бора и фенолформальдегидной смолы (СФП-012А) и в холодном состоянии прессуется при

давлении 45...55 МПа. Далее следует двухстадийное горячее прессование, которое является наиболее распространенным технологическим процессом при изготовлении алмазосодержащих композиционных материалов и инструмента на фенолформальдегидных смолах:

1) нагревание под давлением 15...25 МПа до 375...385 К;

2) давление поднимается до 30...50 МПа и нагревание продолжается до достижения температуры 450...460 К с последующей выдержкой в течение 20...40 мин.

Предварительное спекание заготовки в открытой пресс-форме приводит к полимеризации органического связующего, выделению продуктов полимеризации и разложению отвердителя. В интервале температур спекания 440...460 К полимеризующаяся фенолформальдегидная смола в течение 6...9 мин находится в вязкопластичном состоянии, а затем переходит (через 5...8 мин) в твердое. В течение 3...6 мин из шихты удаляется основная часть продуктов полимеризации (80...90%). При горячем прессовании вязкая матрица полностью не заполняет зазоры пресс-формы и часть газообразных продуктов полимеризации удаляется при спекании под давлением, что способствует снижению пористости получаемых образцов композиционного материала.

#### Методика проведения исследований

На первом этапе для образца №2 при постоянной нагрузке  $N = 5Н$  определяется коэффициент трения для скоростей скольжения  $v = 20...70$  м/мин. Затем измерения проводятся при изменяемой нагрузке  $N = 1...5Н$  для скорости скольжения, при которой коэффициент трения оказывается минимальным.

На заключительном этапе для оптимальных в выбранных диапазонах скорости скольжения и нагрузки ( $v = 45$  м/мин,  $N = 5Н$ ) измеряется коэффициент трения для образцов 1 и 3. Время измерений для всех опытов составляет 8 минут. Опыты проводятся без смазки.

#### Результаты и их анализ

Исследования, проведенные на первом этапе, показали, что влияние скорости скольжения на величину среднего коэффициента трения незначительно (рис. 4,а). Однако, для каждой из рассматриваемой скоростей, наблюдается увеличение коэффициента трения со временем до достижения установившейся величины (рис. 5). Видимо это объясняется повышением температуры в зоне контакта. Такая же тенденция отмечена и для различных нагрузок при постоянной скорости скольжения.

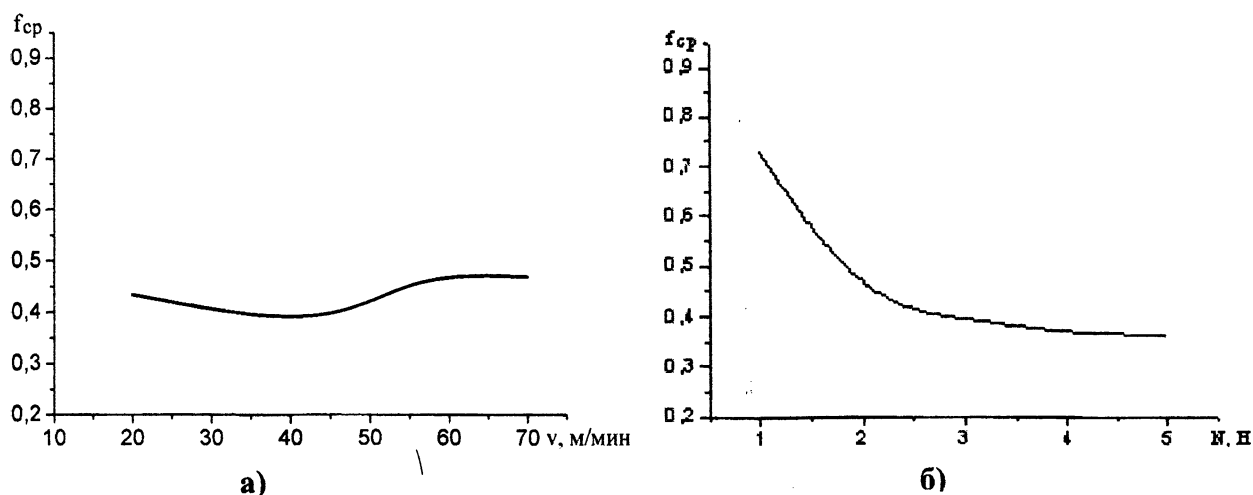


Рисунок 4 – Зависимость среднего коэффициента трения от скорости скольжения и нагрузки

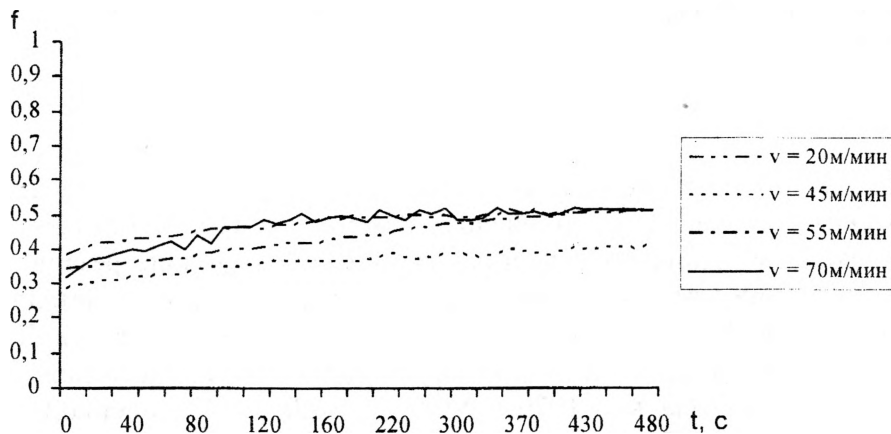
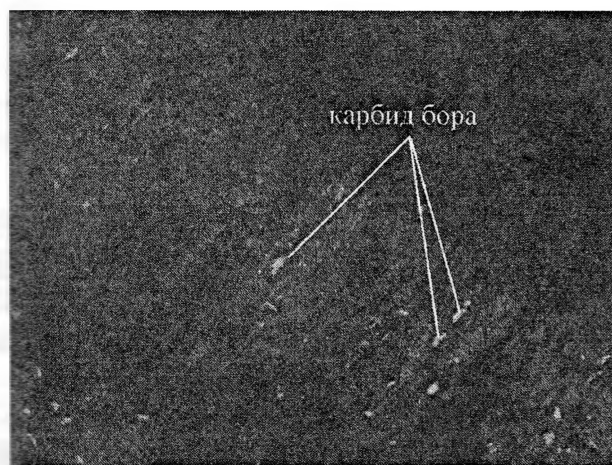
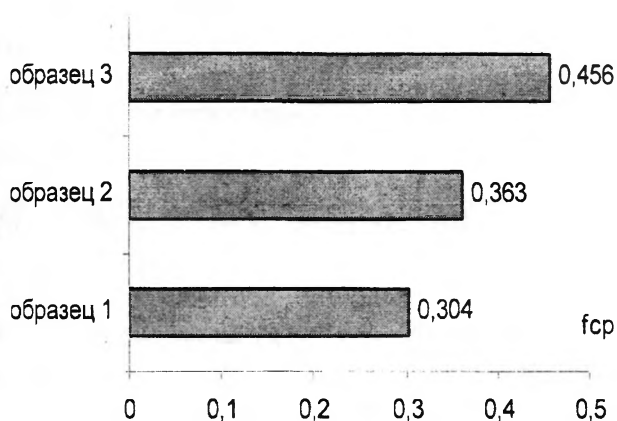


Рисунок 5 – Изменение коэффициента трения во времени ( $N = 5Н$ )

Уменьшение коэффициента трения с ростом нагрузки от 1 до 2 Н (рис. 4,б) обусловлено упругим контактом между индентором и образцом. Но уже в диапазоне нагрузок 2...5Н происходит переход к пластическому контакту и устанавливается практически постоянное значение коэффициента трения. Характерный для каждого из опытов вид дорожки трения показан на рис. 6,а. Как видно износ образца происходит в результате истирания органического связующего и карбида бора (светлые пятна). При этом наблюдался и массоперенос смолы на индентор.



а)



б)

Рисунок 6 – Дорожка трения (а);– зависимость коэффициента трения от состава образца б)

Влияние на коэффициент трения концентрации наполнителя и смолы показано на рис. 6,б. Отмечен рост коэффициента трения с увеличением доли смолы в образце. Видимо, это связано с тем, что индентор глубже внедряется в образец, в результате растет площадь контакта и работа необходимая на совершение пластической деформации.

#### Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено влияние концентрации наполнителя и органического связующего на коэффициент трения. Оптимальными с точки зрения трибологических характеристик являются образцы с минимальным содержанием смолы.

Создание алмазобразивного инструмента с оптимальными трибологическими характеристиками позволит снизить тепловыделение в зоне резания. В результате термомеханическая деструкция шлифовального круга на органическом связующем, имеющем повышенную чувствительность к тепловыделению из-за малой теплопроводности фенолформальдегидных смол, наступит через большой интервал времени. Это позволит

избежать преждевременного вырывания работоспособных алмазных зерен и повысить ресурс работы инструмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грабченко, А. И. К вопросу технологического обеспечения качества изделий из поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтв. материалы. – 1979. – № 3. – С. – 50–53.
2. Грабченко, А. И. Динамика явлений, происходящих в зоне резания, и выходных показателей обработки при алмазном шлифовании сверхтвердых поликристаллов // Сверхтв. материалы. – 1980. – № 6. – С. – 55–60.
3. Грабченко, А. И., Алексеев, К. М. вопросы механики микроразрушения синтетических сверхтвердых поликристаллов при алмазном шлифовании // Сверхтв. материалы. – 1979. – № 2. – С. – 20–24.
4. Тищенко, В. Т., Коновалов, В. А., Чалый, В. Т., Когосов, Л. П. Антифрикционные свойства органических связок алмазных кругов // Синтетические алмазы. – 1971. – № 2. – С. – 26–28.
5. Лавриненко, В.И., Шепелев, А.А., Солод, В.Ю. Особенности фрикционного контакта связок кругов из СТМ и обрабатываемых материалов // Сверхтв. материалы. – 1995. – № 5. – С. – 26–29.

УДК 621.9.011:517.962.1

*Довнар С.С.*

### **МКЭ-МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРОНТА СДВИГА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛА**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

В ходе тонкого резания металла зону стружкообразования регулярно пересекают фронты сдвига [1, 2]. Фронт сдвига – это тонкая прослойка локализованного скольжения. Она проходит между режущей кромкой инструмента и свободной поверхностью обрабатываемого металла вдоль зоны стружкообразования. Предположительно, металл во фронте сдвига квазиожижается на краткое время и, поэтому, допускает легкое скольжение стружки относительно материала детали. В ходе резания регулярно чередуются стадия объемных пластических деформаций в зоне стружкообразования и стадия фронта сдвига [3, 4]. Отработавший фронт сдвига, по которому уже прошло локализованное скольжение, постепенно смещается в стружку. Именно фронты сдвига придают стружке характерный зазубренный рельеф на ее свободной поверхности.

Цель настоящей работы – смоделировать напряженно-деформированное состояние зоны резания после возникновения фронта сдвига. Моделирование выполнялось в помощь метода конечных элементов (МКЭ). Оно производилось в плоской, квазистатической постановке. Моделирование зоны резания до возникновения фронта сдвига (на стадии объемных пластических деформаций) описано, например, в работе [5].

Принципиальная схема зоны резания представлена на Рисунок 1. Резец А толкает своей передней поверхностью стружку В вправо. Стружка имеет возможность смещаться относительно обрабатываемой детали С по фронту сдвига FS. Ожидается движение стружки вправо и вверх.

В массиве стружки В отметим клинообразный район 3, который будем называть язычком стружки. В нем предполагается наиболее сложное напряженно-деформированное состояние. Язычок находится между закруглением режущей кромки и фронтом сдвига.

В модели учтены три контактные пары поверхностей. Во-первых, это контакт 1 между передней поверхностью резца и стружкой. Во-вторых, это контакт 2 между задней поверхностью резца и деталью. В-третьих, это контакт между верхней и нижней сторонами фронта сдвига FS.