



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Технологическое оборудование»

А. В. Ажар
А. Д. Лапука

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ЗАТЫЛОВАНИЯ
ПРОФИЛЬНЫХ ФРЕЗ

Пособие

Минск
БНТУ
2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Технологическое оборудование»

А. В. Ажар
А. Д. Лапука

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ЗАТЫЛОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ФРЕЗ

Пособие
для обучающихся по специальности 1-36 01 03
«Технологическое оборудование машиностроительного
производства»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области машиностроительного оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2024

УДК 621.93.024.74: 621.914.2 (075.8)

ББК 34.634 (я7)

А34

Рецензенты:

А. В. Шахнович, А. Б. Торган

Ажар, А. В.

А34 Теория и практика затылования профильных фрез: пособие для обучающихся по специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / А. В. Ажар, А. Д. Лапука. – Минск: БНТУ, 2024. – 97 с.

ISBN 978-985-583-981-2.

В пособии описаны профильные (фасонные) затылованные фрезы. Дана их классификация по различным конструктивным и функциональным признакам. Представлены сведения о способах формирования режущих поверхностей инструмента в зависимости от условий формообразования после переточки и месте технологии затылования при формировании задней поверхности зуба. Проанализированы способы и дана аналитическая оценка применяемых форм кривых затылования в соответствии с требованиями к затылованным поверхностям с обоснованием применения спирали Архимеда в качестве основной. Описана технология затылования зубьев фрезы по задней поверхности и их затачивания по передней поверхности. Приведены рекомендации по назначению режимов резания и кинематической настройке специализированных станков на операции затылования фрез. Особое внимание уделено способам выбора формы круга и схемы шлифования профиля зуба фрезы, методам расчета габаритных размеров заточного инструмента. Представлена инновационная методика параметрического компьютерного моделирования с целью оптимизации процесса затылования зуба инструмента. Приведены примеры апробации метода 3D-моделирования операции затылования фасонных фрез.

УДК 621.93.024.74: 621.914.2 (075.8)

ББК 34.634 (я7)

ISBN 978-985-583-981-2

© Ажар А. В., Лапука А. Д., 2024

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. КОНСТРУКЦИИ ПРОФИЛЬНЫХ ЗАТЫЛОВАННЫХ ФРЕЗ, МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ, НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ.....	9
1.1. Общие сведения о профильных затылованных фрезам	9
1.2. Классификация затылованных фрез	12
1.3. Конструкции профильных фрез	15
1.4. Выводы по результатам анализа конструкций профильных фрез.....	24
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О СПОСОБАХ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТА	25
2.1. Способы формирования режущих поверхностей инструмента	25
2.2. Теоретические сведения о затыловании и требования к затылованным поверхностям	27
2.3. Выводы по результатам анализа кривых затылования	39
3. ОСОБЕННОСТИ ЗАТОЧКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФАСОННЫХ ЗАТЫЛОВАННЫХ ФРЕЗ	40
3.1. Практическая реализация процесса затылования на станках	40
3.2. Затачивание и восстановление режущей способности фасонных фрез по передней поверхности после затупления.....	47
4. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СХЕМ ШЛИФОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ФРЕЗЫ ПРИ ЗАТЫЛОВАНИИ	50
5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЗАТОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОПЕРАЦИЮ ЗАТЫЛОВАНИЯ ФАСОННОЙ ФРЕЗЫ.....	55
6. МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАТЫЛОВАНИЯ ФАСОННОГО ПРОФИЛЯ ИНСТРУМЕНТА	58

7. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОЦЕНКИ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ.....	61
8. ЭТАПЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ДЛЯ ЗАТЫЛОВАНИЯ ЗАДНИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ПРОФИЛЬНОЙ ФРЕЗЫ.....	62
9. АПРОБАЦИЯ МЕТОДА 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ ФАСОННЫХ ФРЕЗ	77
9.1. Моделирование шлифовальных кругов для заточки дисковой модульной фрезы, применяемой для предварительной обработки зубчатого венца $m = 8$ мм в деталях, производимых на ОАО «МТЗ»	77
9.2. Моделирование шлифовальных кругов для заточки фасонных многониточных насадных фрез для обработки пазов в статоре линейного шагового двигателя (ЛШД), изготавливаемого на ОАО «Планар».....	79
9.3. 3D-моделирование шлифовальных кругов и анализ операции затылования стандартных дисковых фрез модулем $m = 1-16$ мм	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	94

Введение

Профильные (фасонные) фрезы широко применяются в металлообработке как в условиях единичного (вспомогательное инструментально-штамповое, ремонтно-механическое производство, станкостроение), так и серийного (основное машиностроительное, электротехническое, приборостроительное, авиастроительное производство, нефтегазовая отрасль, деревообработка) производства на универсальном и специализированном оборудовании, в том числе и с ЧПУ. Они обеспечивают высокую рабочую эффективность и позволяют низкоквалифицированному персоналу предприятий обрабатывать поверхности сложного профиля на плоской и цилиндрической поверхности, многониточные и многозубые повторяющиеся профили с прямолинейной и криволинейной производящей. Тем самым они идеально подходят для решения специфичных технологических задач. В условиях автоматизированного производства при использовании многокоординатных станков с ЧПУ фасонные фрезы обеспечивают большую производительность из-за меньшего суммарного пути резания, более простую траекторию движения инструмента и его наладку по сравнению со стандартными фрезами универсального назначения. Сами фасонные фрезы постоянно совершенствуются с целью достижения большей производительности, стойкости и общего ресурса, связанного с суммарным числом переточек или другого способа восстановления режущей способности.

Однако фасонная фреза – это специальный или специализированный инструмент со сложной фасонной образующей профиля, точность которого напрямую влияет на точность получаемой детали [1–5]. Контакт профиля инструмента с обрабатываемой поверхностью может осуществляться по всему профилю инструмента или отрезку кривой в зависимости от выбранного метода формообразования. Поэтому на точность обработки влияет не только точность профиля инструмента, но и положение его относительно обрабатываемой поверхности, а также точность назначения величин кинематических взаимосвязей относительного движения инструмента и детали. Так как процесс резания невозможен без заточки режущих поверхностей под принятыми углами резания (передним γ , задним α , α_1 , в плане φ , φ_1 , наклона режущей кромки λ , стружечной канавки ω и т. д.) и наличия стружечных канавок (межзубых впадин), то при

изготовлении и дальнейшем восстановлении режущей способности фасонного инструмента необходимо грамотно решать задачу формирования неперетачиваемой (задней) поверхности инструмента в зависимости от изменяющихся условий формообразования после переточки [6; 7]. При невозможности восстановить форму или положение режущей поверхности фасонного инструмента после переточки она должна быть максимально приближена к исходной в пределах точности выбранного метода обработки и получаемых допустимых размеров обрабатываемой поверхности. В связи с этим большинство фасонных фрез имеют затылованную заднюю поверхность, полученную в результате спиралевидной заточки (архимедова, логарифмическая спираль и т. д.) при изготовлении, что позволяет обеспечить допустимые задние углы вдоль всего профиля, как у нового, так и у переточенного инструмента, а также постоянную высоту и размеры профиля при переточке по передней поверхности [3; 8].

Фрезы с затылованными задними поверхностями уступают остро-заточенным по параметру стойкости и производительности при первичном использовании, т. к. не обеспечивают получения оптимальных задних углов вдоль всего фасонного профиля зуба, но значительно превосходят их по параметру общего ресурса и точности после восстановления режущей способности переточкой по передней поверхности после затупления.

Сама операция затылования является финишной при изготовлении большинства точных фасонных фрез и осуществляется шлифовальными кругами стандартного профиля в несколько этапов или с помощью специального фасонного профиля за один этап [9]. Данная операция осуществляется на специализированном затыловочном оборудовании, оснащённом дополнительными кинематическими цепями [10–13]. Она характеризуется низкой производительностью из-за многопроходности, малой окружной скорости вращения инструмента, наличия холостых ходов при отводе круга при переходе от зуба к зубу при затыловании фрезы. Повышенная трудоемкость операции заточки вызвана также сложностью настройки станка и оснастки, необходимостью правки круга на специальном приспособлении или фасонным накатником, высокими требованиями к точности изготовления затачиваемого инструмента.

Это указывает на то, что стоимость производства фасонной фрезы выше стандартной, что влияет на себестоимость изделия, обра-

батываемого ей. При этом сложность технологии и стоимость переточки затылованных инструментов с фасонным профилем не высокая и осуществляется тарельчатыми (чашечными) кругами по передней поверхности инструмента, что снижает эксплуатационные расходы на инструмент.

Одним из путей повышения эффективности производства фасонных фрез является оптимизация операции затылования на основе анализа методов и схем шлифования профиля фрезы при затыловании [8; 9]. Выбор формы, диаметра, профиля и положения шлифовального круга в сложившейся практике заточки инструмента основывается на приблизительном расчете диаметра круга [1], не учитывающем ряд параметров конструкции затылуемой фрезы, проверку которого осуществляют опытным путем, как и выбор круга возможно большего диаметра, обеспечивающего допустимую длину затылования. Наименьший и наибольший диаметр шлифовального круга проверяется также прочерчиванием [3; 14]. Использование этого метода без использования современных САПР при подготовке производства становится трудоемким и неточным способом решения поставленной задачи, не позволяющим оценить точность 2D-построений на реальном фасонном профиле фрезы. Поиск решения дифференциально-геометрическими методами [7; 15–17], описывающими формообразование поверхности инструмента при заточке, представляет определенную проблему в связи со сложностью математического аппарата для описания режущей поверхности шлифовального круга и траектории его перемещения при формообразовании неперетачиваемой затылованной задней поверхности. Наличие пространственных ограничений на конечное положение круга при заточке приводит к необходимости составлять и решать системы дифференциальных уравнений, описывающих сопрягаемые поверхности шлифовального круга и затылуемой поверхности с учетом накладываемых ограничений. Разные затачиваемые профили, траектории и поверхности затылования требуют составления различных математических моделей и не имеют явного графического представления для анализа точности расчета положения, размеров и формы кругов для затылования, что затрудняет их применение на этапе подготовки производства.

Альтернативой для решения широкого спектра оптимизационных задач является использование современных средств параметри-

ческого 3D-моделирования при конструировании, разработке технологии и подготовке производства фасонных затылованных фрез [18]. Для решения конкретных задач необходимо разрабатывать соответствующие методики, что, в свою очередь, дает возможность эффективно решать задачи экономии материальных ресурсов на изготовление фрез и увеличения срока службы изготавливаемого инструмента. Возникает возможность еще на этапе проектирования проводить анализ конструкции фрезы с точки зрения увеличения числа зубьев, изменения размеров стружечной канавки и самого зуба с точки зрения не только возможности размещения стружки и допустимой прочности зуба, но и возможности его изготовления на существующем заточном оборудовании.

1. КОНСТРУКЦИИ ПРОФИЛЬНЫХ ЗАТЫЛОВАННЫХ ФРЕЗ, МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ, НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1. Общие сведения о профильных затылованных фрез

Профильные (фасонные) фрезы применяются для обработки прямолинейных и криволинейных выступов, канавок и пазов усложненного фасонного профиля на призматических (оконных рам, багетов) и цилиндрических деталях (лопасти турбин), прямых канавок на шлицевых валах прямобочного, эвольвентного, треугольного профиля, прямых и винтовых канавок и межзубных впадин на цилиндрических, конических, сферических режущих инструментах, червяков, наружных и внутренних резьб различного профиля (метрические, дюймовые, трубные, прямобочные) на цилиндрической и конической поверхности, для межзубных впадин на цилиндрических прямозубых и косозубых, а также червячных колесах. Основные методы формообразования (образования производящих линий), применяемые при резании – это метод копирования и обката (огибания). Первый применяется для обработки всех вышеперечисленных поверхностей, в том числе зубчатых и шлицевых профилей, в условиях единичного и мелкосерийного производства, второй для обработки зубчатых колес и шлицевых валов в условиях серийного и массового производства. Отличительной особенностью фасонной фрезы от стандартных фрез общего назначения является то, что это специальный инструмент, который проектируется с учетом габаритных размеров и профиля рабочей поверхности обработки.

Фасонные фрезы широко применяются в металлообработке, т. к. обеспечивают высокую рабочую эффективность и позволяют низкоквалифицированному персоналу предприятий на универсальном и специализированном оборудовании обрабатывать поверхности сложного профиля. Исходя из этого, они идеально подходят для решения специфичных технологических задач. Широко применяются в инструментальном производстве при изготовлении инструментальной оснастки, штампов и прессформ, в станкостроении и ремонтно-механических цехах, в электротехнической промышленности и приборостроении при изготовлении роторов и статоров электромашин, в машиностроении при изготовлении деталей и уз-

лов трансмиссии, в авиастроении, при производстве оборудования для нефтегазовой отрасли, в деревообработке и мебельном производстве и т. д.

Большинство фасонных затылованных фрез имеют цилиндрическую форму с расположением фасонного профиля на наружной образующей. По конструктивному исполнению большинство этих инструментов цельные из быстрорежущей или инструментальной стали, но в ряде случаев для повышения производительности, экономии дорогостоящей вольфрамосодержащей быстрорежущей стали и возможности многократного использования корпуса инструменты изготавливают с напайной режущей частью или со вставными сменными ножами или пластинами, в том числе из твердого сплава. Сборными чаще всего делают червячные фрезы со вставными рейками. Ряд конструкций таких фрез, называемых фрезами с поворотными рейками, затачивают по задней поверхности в отдельном технологическом корпусе на круглошлифовальном станке по всей длине зуба и устанавливают в рабочий корпус с пазом под рейку, обеспечивающим поворот ее задней поверхности на заданный задний угол. В отличие от фрез, затылуемых после установки реек на затыловочном станке, такие фрезы имеют больший ресурс благодаря большему числу переточек, но меньшую точность из-за погрешностей установки в корпусе (погрешность шага, биение профиля) которые невозможно устранить путем заточки после сборки инструмента. Для ряда фасонных поверхностей применяются концевые острозаточенные фасонные фрезы (сферические, пальцевые и т. д.), но они менее производительные, имеют меньший ресурс и быстрее изнашиваются. В условиях автоматизированного производства при использовании многокоординатных станков с ЧПУ большинство открытых фасонных поверхностей можно обработать стандартными острозаточенными концевыми и дисковыми фрезами, но операция фрезерования требует высокой квалификации обслуживающего персонала, сложной технологической подготовки, связанной с подготовкой и отладкой сложной управляющей программы, а при обработке глубокого рельефного повторяющегося контура длительного цикла многопроходной обработки консольного инструмента пониженной жесткости на дорогостоящем оборудовании.

Фасонные затылованные фрезы, работающие методом копирования в зависимости от обрабатываемого профиля и диаметра, быва-

ют дисковые (пазовые, полукруглые, для обработки канавок нормализованных инструментов и т. д.) и втулочные (многониточные, резьбовые гребенчатые и т. д.) насадные, а также хвостовые (резьбовые, пазовые и т. д.). Фрезы, работающие методом обката в основном втулочные насадные (червячные модульные, шлицевые), т. к. это многониточные инструменты с расположением зубьев по винтовой образующей.

Следует отметить, что затылование применяется не только у фасонных фрез, но и для заточки задних поверхностей ряда сверл, метчиков, плашек.

Фрезы, работающие методом копирования, имеют профиль зуба, совпадающий (при обработке прямолинейных поверхностей) или определяющий профиль (при обработке винтовых поверхностей) обрабатываемой поверхности. Фрезы, работающие методом обката, имеют профиль зуба отличный от образующей профиля изделия, которая, в свою очередь, является огибающей последовательных положений профиля зуба инструмента в процессе движения обката, определяемого качением исходной делительной окружности детали относительно исходной прямой инструментальной рейки инструмента. При этом исходный профиль инструментальной рейки хоть и в меньшей степени, но также влияет на точность получаемого профиля детали. Таким образом, основной задачей при профилировании фасонных фрез является получение при изготовлении, сохранении исходного инструментального профиля в процессе наладки и эксплуатации, а также восстановление режущих свойств инструмента после переточки. Проблемой, которую надо решать при профилировании фасонных фрез, является наличие передних и задних углов заточки зуба, а у червячных фрез – наличие винтового зуба с прямыми или винтовыми стружечными канавками, определяемыми углом наклона винтовой линии. Данные геометрические параметры искажают исходный инструментальный профиль и требуют учета при определении погрешности обработки и корректировки профиля при повышении точности во время резания. Второй немаловажной задачей при эксплуатации фасонных фрез является сохранение заданных параметров геометрии и, в частности, задних углов вдоль всего профиля в любом нормальном сечении к режущей кромке, а также во всех радиальных сечениях зуба на всех конхоидах после переточки по передней поверхности. Для большин-

ства фасонных профилей решить эту задачу существующими методами и применяемым оборудованием для заточки фрез невозможно. Но можно получить результаты, удовлетворяющие минимальным требованиям точности, стойкости и производительности резания, долговечности (общего ресурса с учетом необходимого количества переточек) инструмента. Так в отличие от стандартных фрез общего назначения, где задние поверхности получаются методом плоской заточки, а зубья острозаточенные и при затуплении перетачиваются в зависимости от вида преобладающего износа, как по передней, так и по задней поверхности, фасонные фрезы затачиваются по криволинейной поверхности в виде архимедовой логарифмической спирали, радиусом окружности и методом линейного затылования, а перетачиваются при затуплении только по передней поверхности, независимо от вида износа, что позволяет сохранить высоту профиля зуба и обеспечить удовлетворительные задние углы, как у нового, так и у восстановленного инструмента. Наибольшее распространение в инструментальном производстве получил первый метод, как наиболее простой с точки зрения реализации и имеющегося оборудования, а также обеспечивающий достаточную точность профиля при заточке и восстановлении фасонных фрез.

На основании проведенного анализа, систематизировав конструкции, область применения, методы формообразования, формы кривых затылования и способы затылования составлена классификация фасонных затылованных фрез.

1.2. Классификация затылованных фрез

Затылованные фрезы можно классифицировать по следующим конструктивным и функциональным признакам:

1. По конструктивному исполнению:

1.1. По геометрической форме тела инструмента:

- а) дисковые;
- б) втулочные.

1.2. По способу установки на станке и форме присоединительной части:

- а) насадные (с базированием по отверстию и торцам);
- б) хвостовые (с базированием при помощи цилиндрического или конического хвостовика (конус Морзе).

1.3. *По способу соединения режущей (рабочей) части с присоединительной (корпусной, хвостовой):*

а) цельные;

б) с напайной режущей частью (пластины, ножи);

в) с механическим креплением режущей части (пластины, рейки, ножи) при помощи специальной клиновидной формы паза корпуса, режущей части, клиньев, проставок, штифтов, торцевых колец или гаек;

1.4. *По применяемому материалу:*

а) из быстрорежущей стали;

б) из инструментальной стали;

в) корпус из конструкционной стали, режущая часть из быстрорежущей стали;

г) корпус из конструкционной стали, режущая часть из твердого сплава.

1.5. *По числу повторяющихся фасонных профилей на цилиндрической поверхности инструмента:*

а) одноконтурные;

б) многоконтурные.

1.6. *По расположению ниток с зубьями по наружной образующей профиля (наружному цилиндру):*

а) с кольцевым расположением ниток (зубьев);

б) с винтовым расположением ниток (зубьев.)

2. По методу формообразования при резании:

а) работающие методом копирования;

б) работающие методом обката или огибания.

3. По назначению и виду фрезеруемой поверхности:

а) фасонные прямые и криволинейные поверхности (выступы, канавки и пазы) на призматических и цилиндрических деталях;

б) червяки, резьбы наружные и внутренние различного профиля: метрические, дюймовые, трубные, прямоугольные на цилиндрической и конической поверхности;

в) зубчатые венцы (междузубные впадины) прямые и винтовые на цилиндрических прямозубых и косозубых, червячных колесах;

г) прямые канавки на шлицевых многошпоночных валах прямобочного, эвольвентного, треугольного профиля;

д) прямых и винтовых канавки, спинки зубьев и межзубые впадины на цилиндрических, конических, сферических режущих инструментах и т. д.

4. По виду кривой затылования при заточке по задней поверхности:

а) затылованные по логарифмической спирали;

б) затылованные по спирали Архимеда;

в) затылованные по прямой;

г) заточенные по радиусу в технологическом корпусе с установкой зубьев (реек) в рабочий корпус со смещением (поворотом) на заданный задний угол (фрезы с поворотными рейками).

5. По направлению затылования:

а) с радиальным;

б) осевым;

в) косым.

6. По количеству затылков на зубе:

а) с одинарным затылованием;

б) с двойным затылованием. Второй затылок получается затыловочным резцом перед термообработкой;

7. По способу затылования:

а) затылованные точением (резцом);

б) затылованные шлифованием (шлифовальным кругом).

8. По применяемому оборудованию при затыловании:

а) на токарно-затыловочном станке для затылования точением с широким профильным резцом;

б) на токарно-затыловочном станке для затылования шлифованием со шлифовальными бабками и отдельным приводом вращения шлифовального круга, установленного на суппорте станка;

в) на резьбошлифовальном станке;

г) на шлифовально-затыловочном станке;

д) на токарном многоцелевом, токарно-фрезерном с управляемой осью *C* и заточном станке с ЧПУ.

9. По применяемым шлифовальным кругам при затыловании:

а) стандартным цилиндрическим кругом прямого профиля (тип 1);

б) цилиндрическим кругом с профилем, запрограммированным (накатниками, шарожками, алмазными карандашами) по профилю затачиваемой фрезы (одноточные, многоточные, черновые, чистовые);

- в) чашечным кругом (тип 11);
- г) пальцевым кругом.

1.3. Конструкции профильных фрез

Исходя из вышеприведенной классификации наиболее распространенными примерами конструкций фасонных затылованных фрез являются:

- дисковые насадные односторонние: дисковые радиусные выпуклые, вогнутые, модульные, профильные;
- втулочные насадные многосторонние:
- с кольцевым расположением ниток (зубьев): резьбовые гребенчатые, для обработки пазов и рифлений;
- с винтовым расположением ниток (зубьев): червячные модульные, червячные шлицевые и т. д.

Типовые конструкции фасонных затылованных фрез технические условия, на изготовление которых стандартизированы, приведены далее [1; 2; 4; 5].

Фрезы пазовые затылованные по ГОСТ 8543-71: $D = 50-200$ мм, $B = 4-40$ мм, $d = 16-40$ мм, $z = 12-20$.

Фрезы фасонные полукруглые выпуклые, вогнутые и радиусные по ГОСТ 9305-93:

1-й тип – полукруглые выпуклые; $D = 50-160$ мм, $L = 2-50$ мм, $d = 16-40$ мм, $R = 1-25$ мм;

2-й тип – полукруглые вогнутые; $D = 50-160$ мм, $L = 6-75$ мм, $d = 16-40$ мм, $R = 1-25$ мм;

3-й тип – полукруглые радиусные; $D = 50-125$ мм, $L = 4-28$ мм, $d = 16-32$ мм, $R = 1-20$ мм.

Фрезы для обработки канавок нормализованных режущих инструментов:

– спиральных сверл диаметром свыше 3 мм для обработки легких сплавов (ГОСТ 19643-74) и труднообрабатываемых материалов (ГОСТ 20694-75);

– зенкоров, оснащенных твердосплавными пластинами (ГОСТ 3231-71*), для обработки нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов (ГОСТ 21540-76*), для обработки канавок и спинок цельных зенкоров (ГОСТ 12489-71), цельных и составных зенкоров для обработки легких сплавов;

– котельных разверток (исполнение 1, ГОСТ 18121-72).

Дисковые модульные фрезы – это одна из разновидностей фасонных дисковых насадных односторонних фрез, работающих методом копирования (рис. 1.1, 1.2). Фрезы имеют профиль зуба, совпадающий с профилем обрабатываемой поверхности. Они применяются для чернового и чистового нарезания прямозубых цилиндрических колес, чернового нарезания зубьев косозубых колес, для обработки колес с шевронными зубьями (при наличии между зубчатыми венцами на ободке канавки для выхода фрезы), чернового, а иногда чистового нарезания прямозубых конических колес, зубчатых реек, шлицевых валов методом копирования в условиях единичного и мелкосерийного производства. Этот метод имеет невысокую производительность и точность, но позволяет получить сложный зубчатый профиль на универсальном оборудовании с простой кинематикой и оснасткой.

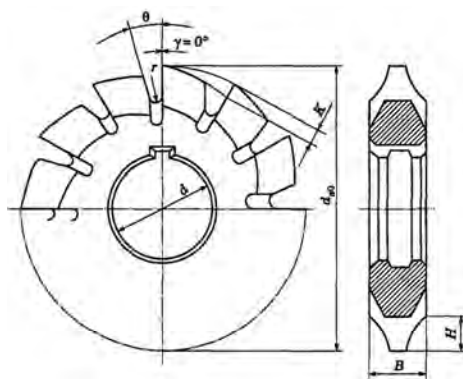


Рис. 1.1. Основные конструктивные элементы дисковой модульной фрезы

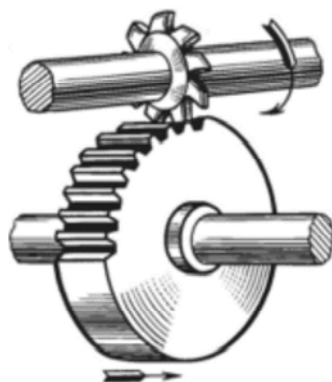


Рис. 1.2. Нарезание зубьев методом копирования дисковой модульной фрезой

Фрезы изготавливают двух типов: черновые с нешлифованным профилем для чернового зубонарезания и чистовые со шлифованным профилем. Фрезы затылованные по архимедовой спирали в радиальном направлении, профиль зуба выполнен по эвольвенте.

На профиле зубьев черновых фрез делают канавки для дробления стружки; передний угол равен $\gamma = 5-10^\circ$, задний угол $\alpha = 10-15^\circ$. Их зубья после термообработки не шлифуются по профилю, поэтому изготавливать черновые фрезы из быстрорежущей стали не ре-

комендуется из-за появления обезуглероженного слоя; их изготавливают из легированных инструментальных сталей, например, 9ХС. У чистовых фрез передний угол γ и угол наклона режущей кромки λ равен нулю, что ухудшает условия резания. Однако такая геометрия уменьшает погрешности в профиле зубьев колес после переточек фрез. Кроме того, упрощается их проектирование. Чистовые фрезы после термообработки шлифуются по профилю, поэтому изготавливаются из быстрорежущей стали, например, Р6М5.

Теоретически для каждого нарезаемого колеса необходимо иметь свою фрезу. Практически, допуская некоторые погрешности профиля, одной фрезой данного модуля можно обрабатывать зубчатые колеса с определенным числом зубьев. Профиль зуба фрезы, входящий в набор, соответствует наименьшему числу зубьев определенного интервала. По ГОСТ 10996-64 предусмотрено два набора фрез: набор из восьми фрез для нарезания зубчатых колес с модулем до 8 мм включительно; набор из пятнадцати фрез для колес с модулем свыше 8 мм. Они предназначаются для обработки колес с $z_1 = 12-\infty$. Номер фрезы из набора выбирают в зависимости от числа зубьев обрабатываемого колеса. Фрезы изготавливаются модулем $m = 1,125-16$, диаметром $D = 50-180$ мм, числом зубьев $z = 14-10$, шириной $B = 4-53$ мм [1; 4].

Червячные фрезы применяют для нарезания цилиндрических колес с прямыми и косыми зубьями внешнего зацепления, червячных колес и шлицевых валов с прямобочным и эвольвентным профилем.

Червячные фрезы представляют собой одно- или многозаходный червяк (рис. 1.3). Расположенные вдоль оси или перпендикулярно виткам червяка профильные стружечные канавки образуют зубья, которые имеют передние и задние по вершине и боковым сторонам углы, необходимые для обеспечения резания. Зубья фрезы затылованы. По направлению витков фрезы могут быть правозаходными и левозаходными. Форма профиля зубьев фрез зависит от формы профиля зубьев нарезаемых колес – эвольвентной, циклоидальной и др., которая при проектировании должна задаваться профилем исходного контура зубчатой рейки. Фрезы делят на червячные чистовые и прецизионные. По способу крепления на зубофрезерном станке фрезы делятся на насадные и хвостовые. По способу крепления режущей части: цельные, со вставными рейками, со сменными кольцевыми сегментами и неперетачиваемыми пластинами.

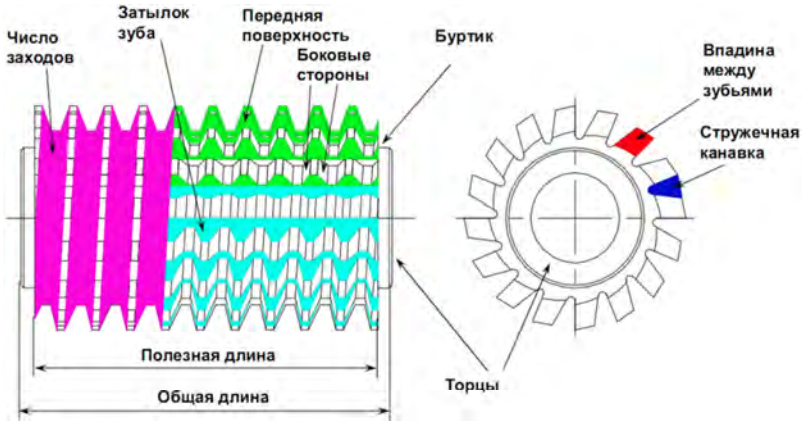


Рис. 1.3. Элементы червячной фрезы

Основные конструктивные параметры червячных зуборезных фрез приведены на рис. 1.4.

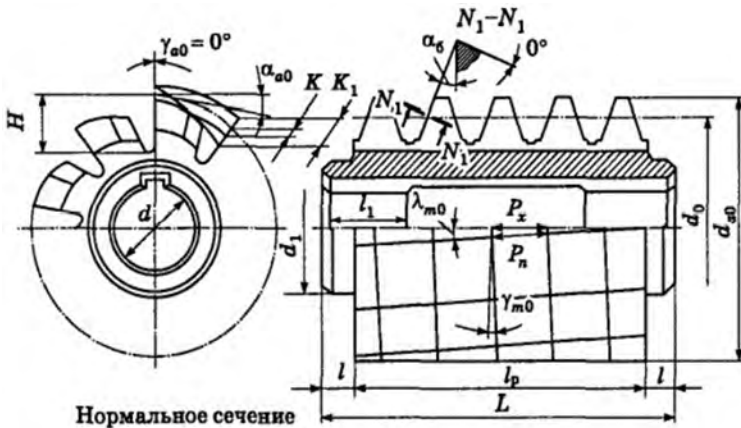


Рис. 1.4. Основные конструктивные параметры червячных зуборезных фрез: L – общая длина фрезы; l_p – рабочая длина; l – длина посадочных поясков; l – длина контрольных буртиков; d_{a0} – наружный диаметр фрезы; d_o – делительный диаметр фрезы; d_1 – диаметр контрольных буртиков; d – внутренний диаметр фрезы; H – полная глубина стружечной канавки; γ_{m0} – угол наклона витков фрезы; λ_{m0} – угол наклона стружечных канавок; γ_{a0} – передний угол заточки фрезы; α_{a0} – задний угол заточки фрезы на вершине зуба; α_6 – боковой нормальный задний угол заточки фрезы; K – величина затылования (подъем кулачка затылования); K_1 – величина второго затылования

Практически все зубчатые колеса в автомобильной, тракторной и транспортной промышленности имеют специальные профили. Для их обработки профиль исходного трапецевидного контура зубчатой рейки имеет модификации (рис. 1.5).

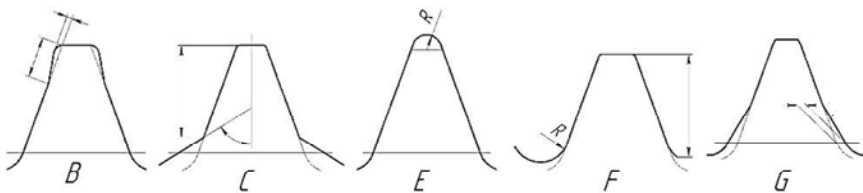


Рис. 1.5. Профили зубьев зуборезных фрез

Наиболее часто встречается профиль с протуберанцем (В). Он предназначен для получения поднутрения на ножке зуба для облегчения финишной обработки. Классический профиль фрезы (С) с фланками (semi-topping) с дополнительными кромками у ножки зуба фрезы предназначен для получения фасок на головке зуба детали. Полнорadiusный профиль (Е) на головке зуба позволяет исключить острые кромки, поскольку именно они являются очагами износа и разрушения. Этот профиль был разработан для увеличения производительности фрезы. Профиль фрезы (F) с радиусом на ножке зуба фрезы, обрабатывающий наружный профиль колеса (topping) позволяет избежать точения наружного диаметра и обработать его червячной фрезой, получив идеальную соосность делительного и наружного диаметра. Специальный профиль (G) позволяет обрабатывать конус на головке зуба. При обработке шлицевых валов профиль зуба фрезы может изменяться от эвольвентного (одно-, двухradiusного) для прямобочных шлицев до трапецевидального с углом исходного профиля как у стандартных зуборезных фрез 20° , так и углом 30° и 15° для эвольвентных шлицев.

В условиях серийного и мелкосерийного производства цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем наибольшее применение находят фрезы червячные однозаходные ГОСТ 10331-81 ($m = 0,15-0,9$ мм) и ГОСТ 9324-2015 ($m = 0,5-40$ мм). В соответствии с техническими требованиями червячные фрезы должны изготавливаться из быстрорежущей стали (ГОСТ 19265-73) с твердостью рабочей части 63–66 HRCэ, при этом твердость рабочей части

фрез, изготовленных из быстрорежущей стали с содержанием ванадия 3 % и более, и кобальта 5 % и более, должна быть 64–67 HRCэ.

В соответствии с ГОСТ 9324-2015 червячные фрезы изготавливаются классов точности 4А, 3А, 2А, А, В, С и D и рекомендуются соответственно для нарезания зубчатых колес 4, 5–6, 7, 8, 9 и 11-й степеней точности. Фрезы изготавливают двух типов: 1 – с осевым шпоночным пазом; 2 – с торцовым шпоночным пазом и двух исполнений: 1 – уменьшенных габаритов (для модулей от 0,5 до 2 мм включительно); 2 – нормальных габаритов (для модулей от 1 до 40 мм включительно).

Червячные фрезы относят к группе обкатных многолезвийных инструментов с конструктивным движением обката. В этом случае между заготовкой и фрезой происходит червячное зацепление. В общем случае режущие кромки зубьев червячных зуборезных фрез расположены на винтовой поверхности основного червяка. При работе оси фрезы и нарезаемого колеса перекрещиваются (рис. 1.6).

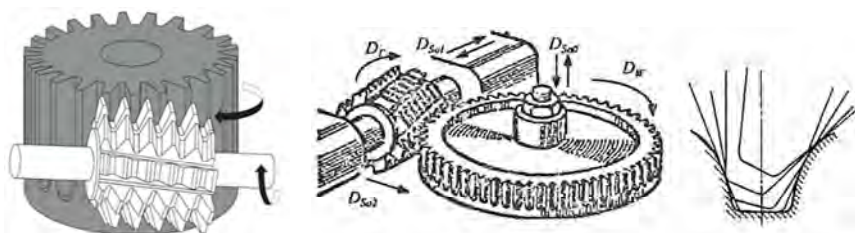


Рис. 1.6. Схема работы червячной зуборезной фрезы и образования профиля зубьев

При главном вращательном движении фрезы D_r режущие кромки вступают в контакт с заготовкой в последовательно смещенных положениях, что в сочетании с вращательным движением заготовки D_w образует движение обката в процессе обработки. Помимо главного движения резания D_r и вращательного движения заготовки D_w в процессе обработки зубчатых деталей могут принимать участие от одного до трех движений подачи. Основным движением подачи является относительное перемещение фрезы и заготовки, вектор которого параллелен оси вращения заготовки (движение D_{so} – осевая подача заготовки).

Метод обкатывания применяют в серийном и массовом производстве. Он имеет следующие преимущества: высокую производи-

тельность и точность обработки, возможность автоматизации, использование одного инструмента для нарезания с одинаковой точностью колес одного модуля с разными числами зубьев. *Одним из направлений совершенствования конструкций червячных фрез является оптимизация числа стружечных канавок (шага зубьев)* [39; 40]. При увеличении числа стружечных канавок сокращается время обработки, уменьшается износ, увеличивается число огибающих, формирующих зуб и стойкость фрезы возрастает. Это связано с тем, что объем материала, который надо удалить при обработке, делится между большим числом зубьев. При этом уменьшается толщина стружки на головке зуба. Уменьшение толщины стружки приводит к уменьшению усилий резания, нагрузка на кромки уменьшается и уменьшается износ. Однако число стружечных канавок нельзя увеличивать бесконечно. Две причины ограничивают увеличение числа стружечных канавок. Первая заключается в том, что при постоянном наружном диаметре увеличение числа канавок уменьшает полезную длину зуба фрезы и сокращает тем самым количество переточек фрезы (рис. 1.7). Вторая причина в том, что увеличение числа стружечных канавок уменьшает их объем, т. е. ограничивает количество стружки. Это может привести к прекращению схода стружки и повреждению зубьев фрезы. Если увеличить наружный диаметр фрезы для компенсации этого недостатка, то увеличивается расстояние подвода и отвода фрезы и, соответственно, время резания.

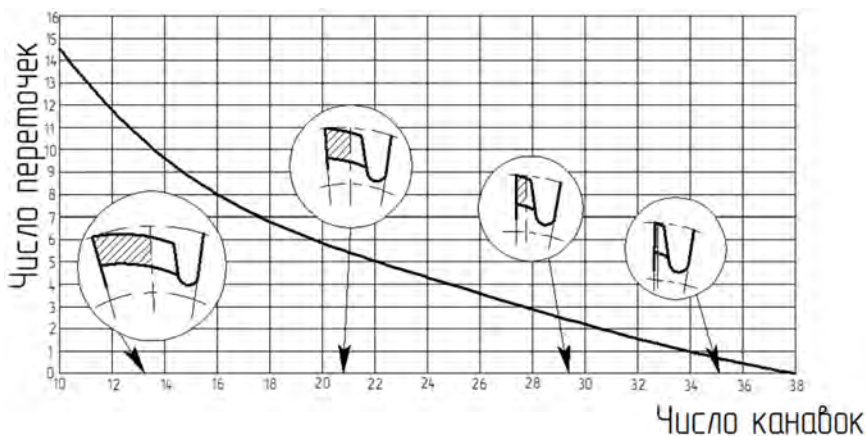


Рис. 1.7. Зависимость длины переточки от количества стружечных канавок

Так для фрез по ГОСТ 9324-2015 число стружечных канавок составляло от 9 до 14. В зарубежных образцах эта величина удвоилась или даже утроилась. На рынке преобладают фрезы, носящие неофициальное название «многозубые», с числом стружечных канавок от 20 до 30. Длина зуба в этом случае допускает 10–12 переточек. Поскольку сегодня стоимость времени обработки существенно выше стоимости инструмента на одну деталь, целесообразно увеличивать число стружечных канавок до разумного предела, заведомо предполагая сокращение количества переточек. В этом случае время обработки сократится, сокращая тем самым эту составляющую затрат на обработку, а стоимость инструмента на деталь незначительно увеличится. В результате сокращаются полные затраты на обработку детали.

Современные червячные фрезы – это цельные насадные (рис. 1.8, *а*) или хвостовые (рис. 1.8, *б*) высокоточные фрезы с наименьшим возможным наружным диаметром, увеличенным числом стружечных канавок, что повышает производительность, увеличенной длины с износостойким покрытием, что повышает стойкость и суммарный ресурс инструмента.



Рис. 1.8. Современные конструкции цельных червячных фрез

Для обработки колес с крупным модулем находят применение фрезы с прогрессивной схемой обработки (рис. 1.9, *а*) и червячные фрезы со сменными многогранными пластинами (рис. 1.9, *б*).



Рис. 1.9. Червячные фрезы для обработки колес с крупным модулем

Насадные резьбовые фрезы (рис. 1.10, 1.11) используются для обработки преимущественно коротких наружных резьб невысокой точности. Нарезание как наружных, так и внутренних резьб осуществляется за счет радиальной врезной подачи на полную глубину h профиля с одновременным осевым перемещением фрезы на величину $S_0 = P$ за время одного оборота заготовки. После нарезания фреза отводится в исходное положение. Такие фрезы имеют высокую производительность и могут нарезать резьбу любого диаметра с данным шагом.

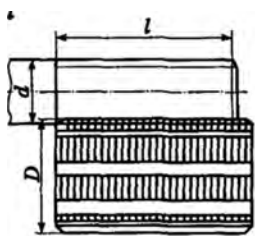


Рис. 1.10. Схемы фрезерования резьбы гребенчатой фрезой

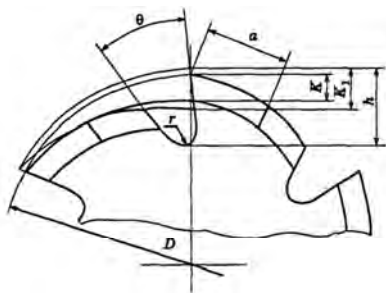


Рис. 1.11. Элементы профиля зуба и впадины резьбовой фрезы

Фрезы с метрическим профилем по ГОСТ 24706-81 изготавливаются диаметром $D = 32-100$ мм с размерами профиля зуба по ГОСТ 1336-77: высотой $h = 4,5-8,5$ мм, длиной затылка $a = 4; 5; 6$ мм,

углом стружечной канавки $\theta = 45^\circ, 30^\circ$, радиусом дна стружечной канавки $r = 2,0-2,5$ мм, величиной затылка $K = 2,0; 2,5; 3$ мм, величиной второго затылка $K_1 = 2,5-4$ мм (рис. 1.23).

Хвостовые резьбовые фрезы (рис. 1.12) используются для нарезания внутренних резьб большого диаметра, как сквозных, так и глухих, преимущественно на станках с ЧПУ. Их можно применять также для обработки наружных резьб при соответствующем конструктивном изменении режущей части.

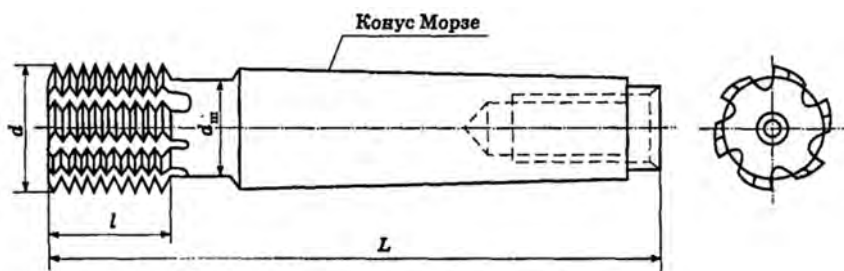


Рис. 1.12. Хвостовая резьбовая гребенчатая фреза

1.4. Выводы по результатам анализа конструкций профильных фрез

Сложнопрофильные фасонные фрезы широко используются в промышленности. Ими обрабатывают прямолинейные и криволинейные фасонные профили на призматических и цилиндрических деталях, межзубые впадины на шлицевых валах, цилиндрические прямозубые и косозубые, червячные колеса, прямые и винтовые канавки и межзубые впадины на цилиндрических, конических, сферических режущих инструментах, червяки, резьбы наружные и внутренние на цилиндрической и конической поверхности.

Данные инструменты находят применение как в условиях единичного и мелкосерийного производства при обработке в основном методом копирования, так и в условиях серийного и массового производства при использовании инструментов, работающих методом обката.

Большинство этих инструментов имеют затылованную заднюю поверхность, полученную в результате спиралевидной заточки (архимедова, логарифмическая спираль и т. д.) при изготовлении, что поз-

воляет обеспечить допустимые задние углы вдоль всего профиля как у нового, так и у переточенного инструмента, а также постоянную высоту и размеры профиля при переточке по передней поверхности.

Современные фасонные фрезы – это многозубые цилиндрические одно- и многониточные насадные или хвостовые высокоточные инструменты с прямой или винтовой образующей профиля, с наименьшим возможным наружным диаметром, увеличенным числом стружечных канавок («многозубые»), что повышает их производительность, с износостойким покрытием, что повышает стойкость, но с уменьшенной полезной длиной зуба, что связано с проблемами заточки таких инструментов по задней поверхности и сокращает количество переточек и общий ресурс фрезы.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О СПОСОБАХ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТА

2.1. Способы формирования режущих поверхностей инструмента

Требования к способу формирования профиля и задней поверхности режущего инструмента зависят от условий формообразования после переточки этого инструмента [6; 7]. Они могут изменяться или оставаться неизменными. Изменение положения и формы вершины, режущей кромки или профиля инструмента после переточки в большинстве случаев приводит к изменению условий формообразования в соответствии с принятым методом и кинематикой процесса резания. В этом случае точность формообразования после переточки инструмента может быть обеспечена путем восстановления положения исходной инструментальной поверхности (ИИП) относительно обрабатываемой с помощью механизмов станков или механизмов регулирования, встроенных в сам инструмент. При наличии таких механизмов и обработке поверхности методом следа или касания возможна переточка инструмента как по одной из поверхностей (передней или задней), так и по 2-м (передней и задней) режущего клина, добываясь наиболее рационального съема поврежденного (изношенного, выкрашенного) слоя режущей части ин-

инструмента. Наличие фасонного участка профиля режущей кромки инструмента, работающего методом копирования, усложняет и удорожает процесс переточки по задней поверхности, поэтому, несмотря на наличие регулирующего устройства и вида преобладающего износа (вдоль передней или задней поверхности) переточка такого инструмента осуществляется по передней поверхности, сопряженной с фасонной задней поверхностью инструмента. В случае невозможности восстановить форму или положение ИИП после переточки инструмента она должна быть максимально приближена к исходной в пределах точности выбранного метода обработки и получаемых допустимых размеров обрабатываемой поверхности. В случае заточки простых мерных инструментов, работающих по методу следа и имеющих режущую (заборную) и калибрующую части, переточка осуществляется по задней поверхности заборной части, а калибрующая часть имеет минимальную обратную конусность для обеспечения максимального числа переточек инструмента. В случае заточки инструментов, работающих методом обката минимизировать потерю точности обработки после переточки можно придав неперетачиваемой (задней) поверхности такой формы которая бы не изменяла или изменяла в минимальной степени форму и углы заточки профилирующей поверхности инструмента после восстановления режущей способности путем переточки по сопряженной (передней) поверхности.

Реализовать поставленную задачу для большинства фасонных многозубых инструментов позволяет спиралевидная заточка (затылование) по задней поверхности при изготовлении. Практика использования инструментов затылованных по спирали Архимеда показала, что по параметру стойкости и производительности нового инструмента они уступают острозаточенным с плоской образующей задней поверхности, т. к. не обеспечивают получения оптимальных задних углов вдоль всего фасонного профиля зуба, но значительно превосходят по параметру общего ресурса и точности после восстановления режущей способности при затуплении. При этом сложность технологии и стоимость переточки затылованных инструментов с фасонным профилем не высокая.

2.2. Теоретические сведения о затыловании и требования к затылованным поверхностям

При выборе вида кривой и метода затылования необходимо учитывать требования, предъявляемые к задним поверхностям инструмента [3]:

1. Обеспечение постоянства профиля, то есть неизменность его высоты в любом радиальном сечении;

2. Обеспечение постоянства заднего угла в любой точке задней поверхности, как в выбранном радиальном сечении вдоль всей длины зуба, так и на конхоидах – кривых, равноотстоящих от выбранной спирали по высоте зуба;

3. Простота затылования, связанная со специализацией применяемого оборудования, простотой и универсальностью настройки и применяемой оснастки, производительностью и стоимостью операции.

Анализ схем и сравнение методов затылования фасонных фрез (табл. 2.1) показал, что на сегодняшний день наиболее простым, распространенным и достаточно точным методом заточки задних поверхностей фасонных фрез является *затылование по спирали Архимеда* на специализированных токарно-затыловочных или резбофрезерных станках. Данный метод обеспечивает необходимую точность профиля и величину положительных задних углов вдоль режущей кромки нового фасонного инструмента, а также позволяет в допустимых пределах получить постоянство профиля зуба и величину заднего угла в выбранном радиальном сечении при переточке по передней поверхности [8].

Для нарезания зубчатых изделий различного профиля широко применяются сборные фрезы с поворотными рейками. Опыт эксплуатации фрез этой конструкции показывает, что, по сравнению с традиционно затылованными фрезами, число допустимых переточек сборных фрез увеличивается в 2–2,5 раза, а производительность обработки – на 30–40 % [5].

Основной особенностью червячных фрез данного типа является обработка профиля зубчатых реек не на затыловочных, а на резбошлифовальных станках без затылующего движения при установке их в такое положение в специальных технологических или рабочих корпусах, когда вершинные поверхности зубьев располагаются на цилиндрической поверхности основного червяка, а боковые – на винтовой. Таким образом, обработка профиля зубчатых реек осу-

шествляется как обработка обычной винтовой поверхности червяка, получившего название «технологический червяк». Подобная установка зубчатых реек позволяет обрабатывать их профиль на всей длине зуба с высокой производительностью и точностью. После окончания обработки профиля в технологическом положении (корпусе) зубчатые рейки переносятся в рабочий корпус, пазы которого служат для установки их под необходимым задним углом по вершине, и закрепляются различными средствами.

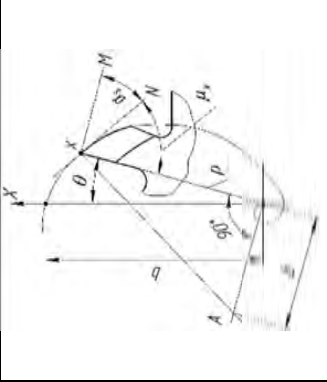
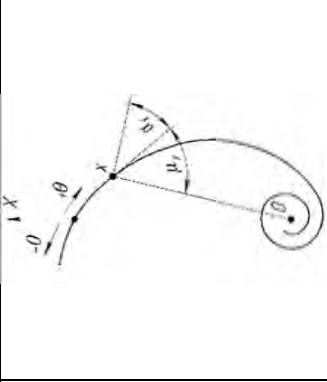
Наибольшее распространения данные фрезы получили в автомобильной промышленности. Существует большое разнообразие различных конструкций червячных фрез с поворотными рейками, наиболее распространенными из которых являются фрезы фирм «Сампутенсили» (Samputensili, Италия) – ВАЗ, «Клингельнберг» (Klingetnberg, ФРГ) – КАМАЗ, «Заацор» (Saazor, ФРГ).

Последнее время зарубежные фирмы отказались от производства таких фрез из-за роста требований к точности зубообработки и невозможности ее достижения предлагаемыми конструкциями. Модернизированный вариант конструкции сборной фрезы ВНИИ инструмента используется в настоящее время на ОАО МТЗ и МЗШ (Республика Беларусь) для предварительной обработки зубчатых профилей.

Технологические сложности получения точных фрез с поворотными рейками связаны с тем, что обработка профиля зубчатых реек производится в определенном технологическом положении (в рабочем или технологическом корпусе) и при переносе их из одного положения в другое резко снижается достигнутая при финишной обработке точность. Это требует значительного ужесточения норм точности изготовления всех элементов конструкции рабочего и технологического корпусов, зубчатых реек. Прежде всего это касается установочных баз корпусов и реек, у которых, например, радиальное биение и непараллельность основания паза корпуса осевой плоскости, неплоскостность и непрямолинейность базовых поверхностей зубчатых реек не должны превышать 0,003 мм. Без соблюдения столь высоких требований к точности изготовления отдельных элементов конструкции невозможно обеспечить ее точную сборку и те требования, которые регламентируются техническими условиями на червячные фрезы. Поэтому при создании подобной конструкции следует, прежде всего, исходить из технологических возможностей конкретного производства.

Таблица 2.1

Анализ схем и сравнение и методов затылования фасонных фрез

Характеристика сполования	Форма кривой затылования при заточке фасонной фрезы по задней поверхности	затылование по прямой
<p>Функциональные зависимости, описывающие способ (кривую) затылования</p>	<p>спираль Архимеда</p> <p>Радиус-вектор точки на кривой:</p> $\rho = b\theta,$ <p>где θ – текущий полярный угол для данной точки кривой в радианах; b – постоянный коэффициент равный полярной поднормали</p>	<p>логарифмическая спираль</p> <p>Радиус-вектор:</p> $\rho = ae^{m\theta},$ <p>где m, a – постоянные коэффициенты. При $\theta = 0, \rho = a$</p>
<p>Геометрическое представление кривой затылования</p>		

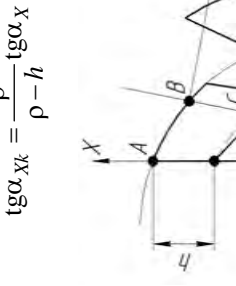
Форма кривой затылования при заточке фасонной фрезы по задней поверхности	
Характеристика сполования	затылование по прямой
Точность профиля фрезы после переточки	логарифмическая спираль Высота профиля сохраняется в допустимых пределах
Изменение задних углов α на вершине в радиальных сечениях вдоль длины зуба	Задний угол: $\operatorname{tg} \alpha = \rho' / \rho = b / b\theta = 1/\theta \neq \operatorname{const}$, где ρ' – производная радиус-вектора кривой по параметру θ . Задний угол изменяется (уменьшается) пропорционально полярному углу. Различие в величинах задних углов вдоль зуба не превышает 2°
Изменение задних углов на конхоидах по высоте зуба	Задний угол: $\operatorname{tg} \alpha_x = \frac{\rho}{b} \operatorname{ctg} \theta \cos \theta$. Задний угол вдоль зуба уменьшается. Теоретически до нуля
Задние углы на конхоидах по высоте зуба:	$\operatorname{ctg} \alpha_{xk} = \frac{b}{\cos \theta} \pm \frac{h}{b} \operatorname{ctg} \theta \cos \theta$

Продолжение табл. 2.1

<p>Характеристика сположения</p>	<p>Форма кривой затылования при заточке фасонной фрезы по задней поверхности</p>	<p>затылование по прямой</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>
<p>Характеристика сположения</p>	<p>спираль Архимеда</p>	<p>логарифмическая спираль</p>	<p>затылование по прямой</p>

$$\operatorname{tg} \alpha_{Xk} = \frac{b}{\rho_A - h}$$

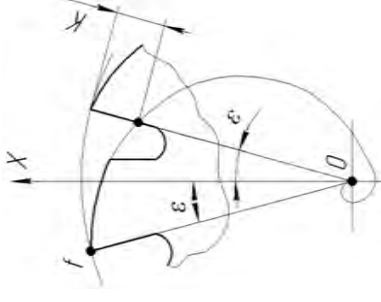
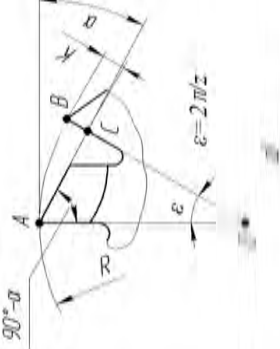
где h – высота зуба или расстояние от вершины до выбранной конхойды.

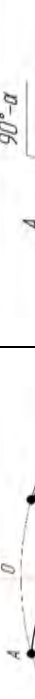


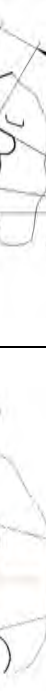


На линиях, равноотстоящих от прямой на вершине зуба (конхондах) задний угол возрастает при приближении к нижней точке C

Характеристика сплюсывания	Форма кривой затылования при заточке фасонной фрезы по задней поверхности	загылование по прямой	
спираль Архимеда	логарифмическая спираль	логарифмическая спираль	
Изменение задних углов на конхоидах по высоте зуба	<p>На линии, равноотстоящей от спирали (конхоиде) задний угол возрастает, погрешность заднего угла по высоте зуба для большинства профилей не превышает 2°</p>	<p>На линии, равноотстоящей от спирали (конхоиде) задний угол возрастает с приближением точки конхоиды к центру фрезы (разность $\rho - h$ уменьшается)</p>	<p>Для обеспечения минимального заднего угла по всей вершине применяют двойное затылование. Максимальный задний угол берется для точки A и точки B находящейся на середине зуба</p>

Продолжение табл. 2.1

Характеристика сподования	<p>Форма кривой затылования при заточке фасонной фрезы по задней поверхности</p>	логарифмическая спираль	затылование по прямой
Закон движения и сложность настройки станка	<p>Закон движения равномерный. Кулачок простой формы. Может использоваться для фрез разного диаметра.</p> <p>Величина затылования:</p> $K = \frac{\pi D}{z} \cdot \operatorname{tg} \alpha$ 	<p>Закон движения неравномерный. Кулачок изготавливается по метке и обрабатывается по точкам. Используется для фрезы одного диаметра.</p> <p>Величина затылования:</p> $K = \frac{2\pi R}{z} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{-m\epsilon} = \frac{\pi D}{z} \cdot e^{-m\epsilon} \cdot \operatorname{tg} \alpha$ <p>Приближенная формула:</p> $K = \frac{\pi D}{z} \operatorname{tg} \alpha.$ <p>Погрешность расчета 8–10 %</p>	<p>Закон движения неравномерный. Кулачок изготавливается по разметке и обрабатывается по точкам. Используется для фрезы одного диаметра.</p> <p>Величина затылования:</p> $K = R \times \left[1 - \frac{\cos^2 \alpha}{\cos(\epsilon - \alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta)} \right] \times \left[1 - \frac{\cos^2 \alpha}{\cos(\epsilon - \alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta)} \right]$ 

Характеристика споловления	Форма кривой затылования при заточке фасонной фрезы по задней поверхности	затылование по прямой	
Закон движения и сложность настройки станка	спираль Архимеда	логарифмическая спираль	
Задний угол в нормальном сечении относительно профиля зуба			
Задний угол в нормальном сечении относительно профиля зуба	<p>Нормальный задний угол α_N уменьшается с уменьшением угла в плане φ. Для нормальной работы минимальный $\alpha_N = 2^\circ - 3^\circ$. В противном случае применяется не радиальное, а косое или осевое затылование, увеличивается угол φ до $5^\circ - 10^\circ$, применяется затылование по прямой вместо затылования по спирали Архимеда</p>		

Окончание табл. 2.1

Характеристика спонирования	Форма кривой затылования при заточке фасонной фрезы по задней поверхности			затылование по прямой
	спираль Архимеда	логарифмическая спираль		
Применяемое оборудование	Токарно-затыловочный, резьбо-шлифовальный, шлифовально-затыловочный станок	Токарно-затыловочный, резьбо-шлифовальный, шлифовально-затыловочный станок	Токарно-затыловочный, резьбо-шлифовальный, шлифовально-затыловочный станок	Токарно-затыловочный, резьбо-шлифовальный, шлифовально-затыловочный станок
Общий ресурс и стойкость инструмента	Затылование обеспечивает пере-точку зуба 6–10 раз на 1/2–2/3 длины зуба. Двойное затылование исключает седлообразность	Удовлетворительные		Удовлетворительные при малой высоте профиля зуба или двойном затыловании
Производительность	Удовлетворительная	Удовлетворительная		Хорошая

Так как достижение требуемой точности профиля зубчатых реек осуществляется в их технологическом положении, когда боковые поверхности зубьев располагаются на винтовой поверхности с шагом основного червяка фрезы, главным вопросом конструирования червячных фрез с поворотными рейками является определение осевого сечения технологического червяка, обеспечивающего заданные размеры зубчатой рейки по передней поверхности. Производится данный расчет после выбора и расчета всех основных конструктивных и расчетных элементов сборной червячной фрезы. Подход к их расчету остается тот же, что и при конструировании обычных цельных червячных фрез, за исключением необходимости производить более детальную конструкторскую проработку отдельных составных частей фрезы. Следует также отметить, что все червячные фрезы с поворотными рейками изготавливаются на базе основного архимедова червяка – с прямыми осевыми стружечными канавками.

Так как профиль осевого сечения технологического червяка является криволинейным, теоретически необходимо изготавливать его по точкам, координаты которых рассчитывают. Однако из-за больших технологических трудностей изготовления и, главным образом, контроля теоретический профиль заменяют прямой линией, проходящей через две крайние точки профиля, расположенные на определенном расстоянии от вершины зуба. Как показала практика, подобная замена вполне допустима.

Расчет основных размеров технологического червяка для обработки профиля заданной фрезы осуществляется в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.1.

В ходе расчета определяются координаты центра червяка $O_T(a, \beta)$ относительно центра фрезы O из условия обеспечения наименьшего искажения профиля при переточках путем обеспечения угла поворота центра червяка по формуле (2.1):

$$\beta = 0,4133 \cdot \varphi_k, \quad (2.1)$$

где φ_k – угол поворота рейки относительно центральной оси, град;

$$\varphi_k = \frac{\pi}{z_o} + (0 + 3^\circ).$$

Радиус наружной окружности червяка рассчитывается по формуле (2.2):

$$R_{aO_T} = \frac{a}{\sin \alpha_\alpha}, \quad (2.2)$$

где α_α – задний угол рейки, град: $\alpha_\alpha = (12 - 15^\circ)$;

a – расстояние (по оси z) от центра червяка до центра фрезы, мм:

$$a = \frac{R_{a0}}{\operatorname{ctg} \alpha_\alpha + \operatorname{tg} \beta},$$

где R_{a0} – наружный радиус фрезы, мм.

Радиус внутренней окружности червяка рассчитывается по формуле (2.3):

$$R_{fO_T} = R_{aO_T} \frac{\sin \alpha_\alpha}{\sin \alpha_f}, \quad (2.3)$$

где α_f – угол между центром червяка и нижней точкой зуба по передней поверхности, град:

$$\alpha_f = \operatorname{arctg} \frac{a}{R_{aO_T} - c - h_0},$$

где c – расстояние (по оси y) от центра червяка O_T до центра фрезы O , мм:

$$c = \frac{R_{a0}}{\operatorname{ctg} \alpha_\alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta + 1}.$$

Высота профиля зуба червяка рассчитывается по формуле (2.4):

$$h_{O_T} = R_{aO_T} - R_{fO_T}. \quad (2.4)$$

Расчет координат (XR_{iT} и YL_{iT}) и углов на правой и левой стороне профиля (α_{xR0_T} , α_{xL0_T}) в осевом сечении технологического червяка (рис. 2.3) осуществляется путем переноса координат (X_i и Y_i) двух

расчетных точек на профиле зуба фрезы по передней поверхности (рис. 2.2). Координаты задаются точками 1 и 2, расположенными соответственно на расстоянии от вершины зуба:

$$h_1 = 0,6 \cdot m_0; \quad h_2 = 2,125 \cdot m_0.$$

Более подробно методика расчета профиля поворотной рейки описана в литературе [5].

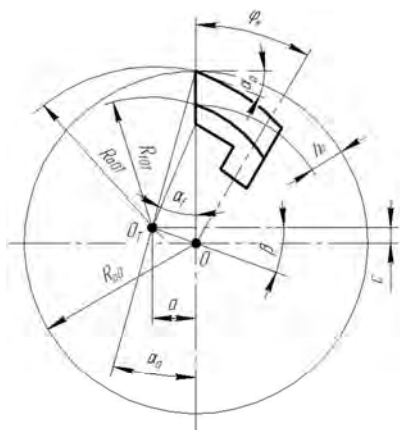


Рис. 2.1. Схема установки поворотной зубчатой рейки

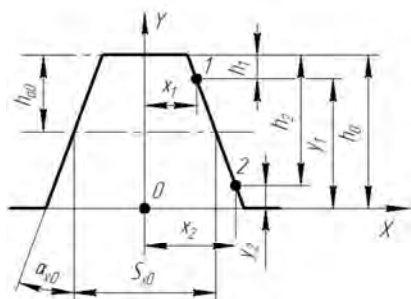


Рис. 2.2. Профиль зуба фрезы по передней поверхности

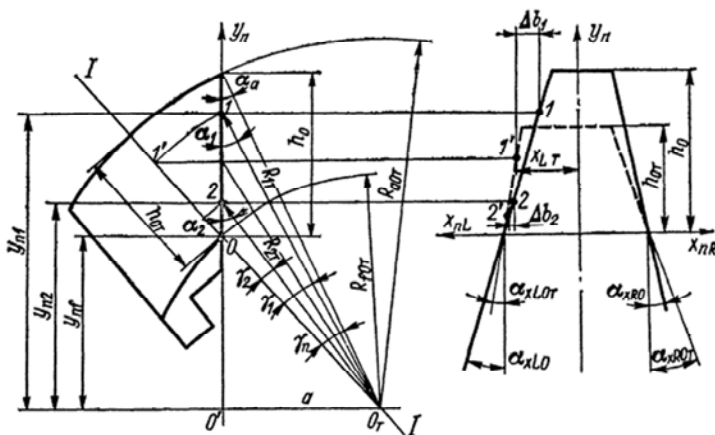


Рис. 2.3. Схема осевого сечения технологического червяка

2.3. Выводы по результатам анализа кривых затылования

Анализ рассмотренных выше кривых затылования показывает, что задние углы не остаются постоянными для всех точек профиля, а меняются в зависимости от удаленности от центра фрезы; эти углы изменяются и при переточках фрезы.

Логарифмическая спираль, хотя и обеспечивает постоянство заднего угла по верхней части зуба, на других участках профиля дает переменный задний угол и не имеет преимуществ по сравнению со спиралью Архимеда.

Непостоянство заднего угла в верхней части зуба, затылованного по спирали Архимеда, незначительно и на работу фрезы практически никакого влияния не оказывает.

Задние углы в разных точках профиля (на конхоиде) у Архимедовой спирали изменяются более равномерно, чем у логарифмической спирали.

При выборе кривой затылования решающую роль играют технологические факторы. В настоящее время в практике применяется в качестве кривой затылования спираль Архимеда по следующим причинам:

1. Очень просто изготовить кулачок для затылования, так как у спирали Архимеда приращение радиус-вектора пропорционально приращению полярного угла. Кулачок легко изготовить на станке, у которого существует согласование между вращательным и поступательным движением. Кулачок с логарифмической спиралью изготавливается по разметке с последующей обработкой кривой по точкам.

2. Кулачок является универсальным, так как его можно использовать для фрез различных диаметров. Для логарифмической спирали и прямой линии для каждого диаметра фрезы требуется свой кулачок. Кулачки характеризуются величиной затылования K , которая на практике выбирается в пределах $K = 0,5-12$ мм (в зависимости от размеров фрезы).

Вариант применения сборных фрез с поворотными рейками, имеющими профиль задней поверхности в виде дуги окружности с центром, смещенным относительно центра фрезы, обоснован для предварительной обработки зубчатых изделий в условиях крупносерийного и массового производства. Повышенный ресурс и производительность этих фрез компенсируются технологическими слож-

ностями получения точных конструкций из-за необходимости переносить окончательно обработанные рейки из технологического корпуса в рабочий.

3. ОСОБЕННОСТИ ЗАТОЧКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФАСОННЫХ ЗАТЫЛОВАННЫХ ФРЕЗ

3.1. Практическая реализация процесса затылования на станках

В зависимости от требований к качеству задней затылованной поверхности и высоты профиля зуба процесс затылования осуществляется только резцом (рис. 3.1), резцом с последующей обработкой шлифовальным кругом (рис. 3.2) или только шлифовальным кругом на станках, имеющих согласованное вращательное движение заготовки и поступательное инструмента в радиальном и, при необходимости, в осевом направлении. Станки, работающие шлифовальными кругами, должны быть оснащены приводом вращения данного инструмента. Это токарно-затыловочные, шлифовально-затыловочные и резьбошлифовальные станки. К группе станков, способных осуществлять затылование, следует отнести токарные и заточные станки с ЧПУ с дополнительными возможностями (управляемой осью C).

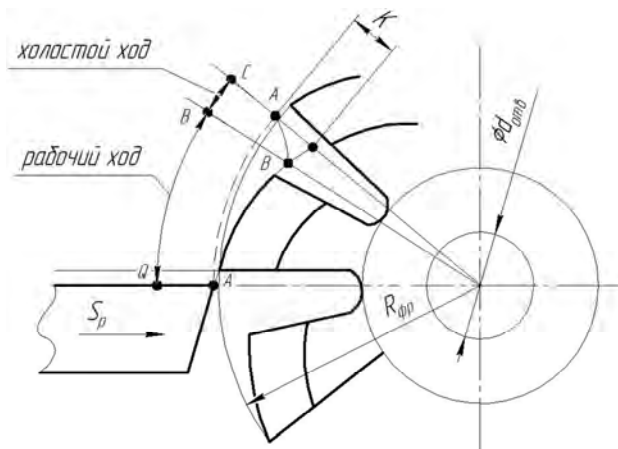


Рис. 3.1. Схема затылования зубьев фасонной фрезы широким резцом

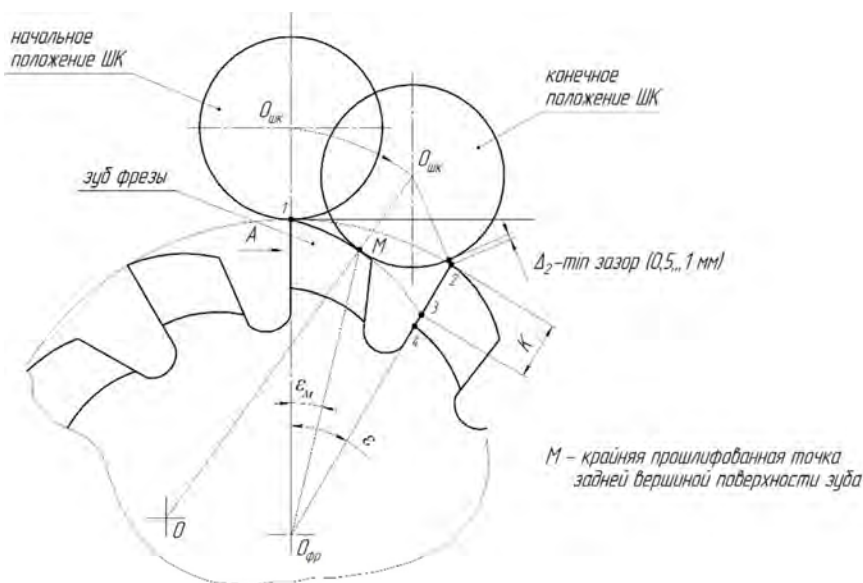


Рис. 3.2. Схема затылования дисковой фрезы цилиндрическим шлифовальным кругом

При затыловании фрезы резец или круг делает проходы: рабочий и холостой. На рабочем ходу происходит съём материала в профиль зуба по спирали Архимеда, таким образом формируется профиль зуба. Начальной точкой будет являться вершина зуба, которая является радиусом фрезы ($R_{фр}$), – точка A , а конечной точкой – точка пересечения спирали Архимеда со стружечной канавкой, точка B . На холостом ходу происходит отвод инструмента. Важно подобрать шлифовальный круг таким образом, чтобы при отводе не происходил резарз следующего зуба. Зуб фрезы следует затыловать целиком. При затыловании резцом это производится как показано на рис. 3.1, пройдя по всему профилю зуба. При заточке шлифованием обычно ограничиваются затылованием на $1/2$ – $2/3$ длины из-за малого окружного шага между зубьями, влияющего на выход шлифовального круга из обработки. При этом может возникнуть седлообразность, которую необходимо рассматривать для каждого случая отдельно, поскольку она может быть как допустимой, так и не допустимой, в зависимости от ее подъема и количества заточек фрезы. Фрезу

можно перетачивать по передней поверхности до 35 % от изначальной длины зуба в связи с ограничениями по прочности и точности обработки окончательно сточенной фрезой.

Основной особенностью затыловочного станка является наличие механизма затылования. Суппорт затыловочных станков совершает возвратно-поступательное перемещение в направлении к затылуемой поверхности и от нее. Для сообщения резцу (шлифовальному кругу) этого движения в поперечном направлении применяют кулачки специального профиля (*чаще всего контур кулачка очерчивается по архимедовой спирали*), установленные в суппорт. Подвижная часть суппорта *1* с пальцем *2* прижимается к кулачку *3* пружиной *4* (рис. 3.3, б). Движение подвижной части суппорта *1* вперед происходит под действием рабочей кривой вращающегося кулачка, а возвращение в исходное положение – по кривой кулачка для вспомогательных движений под действием пружины *4*. Кинематически вращение кулачка связано с вращением шпинделя станка с помощью делительной гитары. Гитару деления настраивают так, чтобы за один оборот шпинделя с заготовкой кулачок повернулся на число оборотов, равное числу зубьев инструмента по окружности.

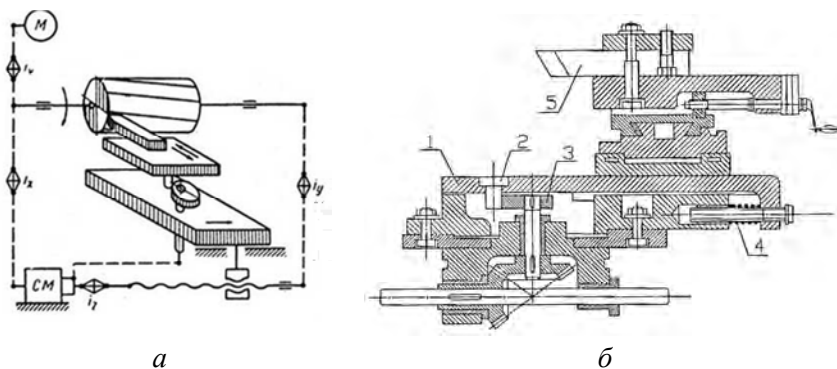


Рис. 3.3. Структурно-кинематическая схема (а) и суппорт токарно-затыловочного станка (б):

1 – подвижная часть; *2* – палец; *3* – кулачек; *4* – пружина; *5* – резец

Форма кулачка должна обеспечить за один оборот поперечную подачу суппорта и его отвод (рис. 3.4). Кулачки делают сменными, с различным шагом спирали в соответствии с величиной падения

затылка зуба фрезы. Рабочую часть кулачка выполняют по архимедовой или логарифмической спирали, а нерабочую – по плавной кривой. Длина рабочей части зависит от ширины зуба затылуемой фрезы и дополнительной величины на вход и выход инструмента. На кулачке располагают либо одну рабочую кривую, либо несколько участков кривых (до четырех) для рабочих и вспомогательных ходов реза (круга), если необходимо уменьшить частоту вращения кулачка.

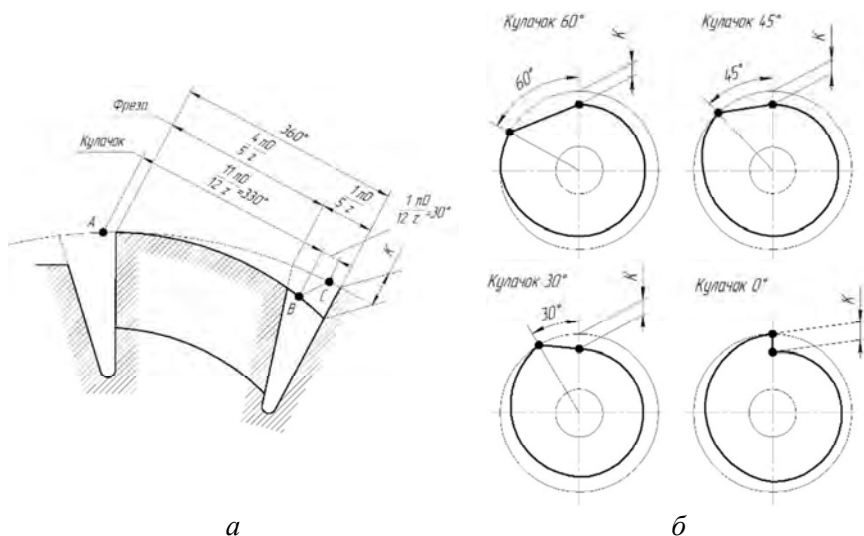


Рис. 3.4. Схема затылования зуба (а) и различные формы кулачков (б):
ABC – траектория движения реза при затыловании

Для фрез со шлифованным профилем применяют двойное затылование зубьев, которое устраняет увеличенный по высоте и по сторонам непрошлифованный участок зуба (см. рис. 4.5). Нешлифованный участок подвергают затылованию резцом с помощью кулачка, величину спада которого делают в 1,3–1,75 раза больше величины спада кулачка для шлифованной части. Двойное затылование может быть выполнено путем раздельного затылования двумя отдельными кулачками со спадами затылка K и K_1 или с помощью одного комбинированного кулачка, снабженного двумя величинами спада K и K_1 . Для затылования червячных зуборезных фрез основ-

ная кривая занимает центральный угол 165° ; дополнительная кривая – угол 135° и кривая вспомогательного хода – угол 60° .

В зависимости от направления движения резца или шлифовального круга при затыловании по отношению к оси центров станка различают три вида затылования: радиальное, косое, осевое (рис. 3.5) [8].

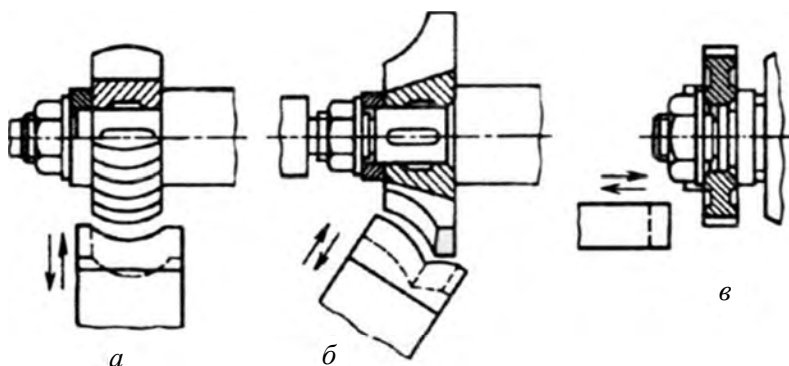


Рис. 3.5. Схемы затылования:
a – радиальное; *б* – косое; *в* – осевое

При радиальном затыловании резец или шлифовальный круг совершает возвратно-поступательное перемещение перпендикулярно оси центров станка в сечении, перпендикулярном оси фрезы. Задний угол в любой точке режущей кромки должен быть не менее 3° . При наличии участка с углом α_N менее 3° производится косое затылование. При косом затыловании достигается большая величина заднего угла α_N на участках профиля с углом φ , стремящимся к нулю. Осевое затылование применяют при наличии участков профиля с углом $\varphi = 0^\circ$. Фасонные фрезы с передним углом, равным нулю, затылуют фасонными резцами или по копиру. Фрезы с положительным передним углом затылуют резцом с скорректированным профилем.

В зависимости от вида затылуемого инструмента и характера затылования существуют различные схемы движений инструмента и заготовки при затыловании.

Затылование дисковых фасонных фрез происходит при непрерывном и равномерном вращении фрезы и непрерывно повторяющемся возвратно-поступательном движении резца (круга) в попе-

речном направлении (рис. 3.6, а) [10–13]. Во время поворота фрезы на угол, соответствующий дуге ab , резец (круг) движется на фрезу и снимает припуск. Затем резец (круг) быстро отводится назад, и когда фреза повернется на угол, соответствующий дуге bc , он займет исходное положение для снятия припуска у очередного зуба фрезы. После каждого оборота заготовки резцу (кругу) сообщают поперечную подачу. Резец (круг) имеет фасонный профиль, соответствующий профилю зубьев затылуемой фрезы.

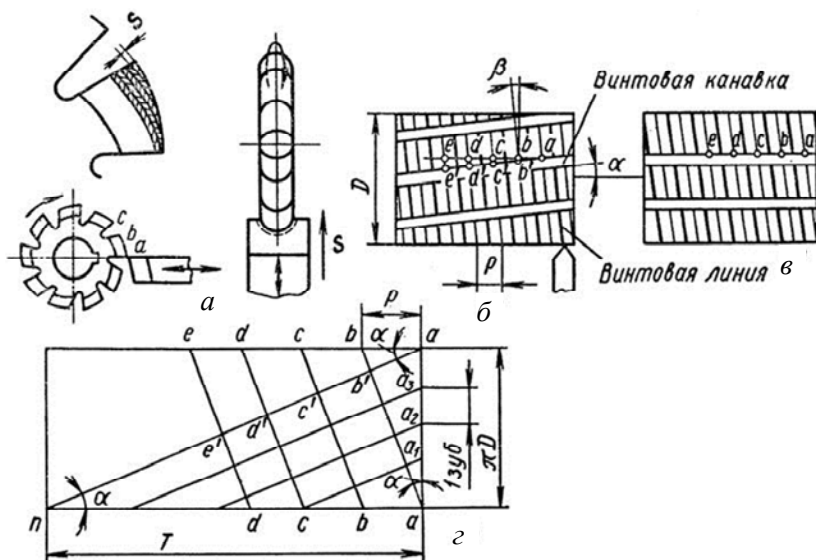


Рис. 3.6. Схемы движений инструмента и заготовки при затыловании

Расчетные перемещения конечных звеньев станка при затыловании дисковой фрезы, имеющей z зубьев:

$$n \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя} \rightarrow n \text{ мин}^{-1} \text{ шпинделя};$$

$$1 \text{ об. шпинделя} \rightarrow z \text{ об. Кулачка} \rightarrow z \text{ двойных ходов резца (круга)}.$$

При затыловании цилиндрических фрез с прямыми стружечными канавками на станке дополнительно осуществляется следующее движение: равномерное продольное перемещение инструмента параллельно оси заготовки (движение продольной подачи).

Расчетные перемещения конечных звеньев, обеспечивающих продольную подачу:

1 об. шпинделя $\rightarrow S$ мм продольного перемещения резца (круга).

При затыловании метчиков и червячных фрез с прямыми стружечными канавками величина продольной подачи соответствует шагу P резьбы или витка затылуемого инструмента.

Расчетные перемещения, обеспечивающие продольную подачу для этого случая:

1 об. шпинделя $\rightarrow P$ мм продольного перемещения резца (круга).

При затыловании червячных (цилиндрических) фрез с винтовыми канавками резец (круг) в течение каждого оборота фрезы, по-прежнему смещаясь в продольном направлении на шаг P или подачу S , должен делать отличное от z число двойных ходов. Это вызвано тем, что положение резца (круга) в точках a, b, c, d, e и т. д. не соответствует началу затылования очередных зубьев (точки a', b', c', d', e' и т. д.). Следовательно, расчетные перемещения для затылования червячной (цилиндрической) фрезы с винтовыми канавками должны отличаться от расчетных перемещений инструмента с прямыми канавками.

На рис. 3.6, б показана червячная фреза с винтовыми канавками: D – диаметр начальной окружности фрезы; P – шаг резьбы; β – угол подъема винтовой линии зуба; α – угол наклона винтовой канавки. Если бы фреза имела прямые канавки (рис. 3.6, в), то при затыловании было бы необходимо, чтобы после каждого оборота фрезы резец (круг) перемещался в продольном направлении на шаг винтовой линии P и, сделав z двойных ходов за один оборот фрезы, оказывался в точках пересечения винтовой линии резьбы фрезы с канавкой, т. е. в точках a, b, c, d, e и т. д. При обработке фрезы с винтовыми канавками резец (круг) в течение каждого оборота фрезы, по-прежнему смещаясь в продольном направлении на шаг P , должен делать отличное от z число двойных ходов. Это вызвано тем, что положение резца (круга) в точках a, b, c, d, e и т. д. не соответствует началу затылования очередных зубьев (точки a', b', c', d', e' и т. д.). Следовательно, расчетные перемещения для затылования червячной фрезы с винтовыми канавками должны отличаться от расчетных перемещений инструмента с прямыми канавками.

На рис. 3.6, z показана развертка условной червячной фрезы, длина которой равна шагу T винтовой канавки (an – развертка винтовой канавки фрезы, aa – развертка начальной окружности фрезы, на которой размещено z зубьев). Точками a, a_1, a_2, a_3 на торце фрезы обозначены начала винтовых канавок, разделяющих зубья. На длине одного витка резьбы фрезы (отрезок ab) размещено больше чем z зубьев, на отрезке $ab' - z$ зубьев и на отрезке $b'b - \Delta z$ зубьев. Следовательно, резец за каждый оборот фрезы, проходя один виток резьбы фрезы (отрезки ab, bc, cd, de и т. д.), должен будет сделать $(z + \Delta z)$ двойных ходов.

Число зубьев, которые размещены на отрезке $b'b$:

$$\Delta z = \frac{bb'}{ab' / z} = \frac{P \sin \alpha}{\pi D \cdot \cos \alpha / z} = \frac{Pz \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi D}. \quad (3.1)$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} \alpha = \pi D / T$, $\Delta z = zP / T$.

Таким образом, за один оборот фрезы резец должен сделать $(z + zP / T) = z(1 + P / T)$ двойных ходов.

Откорректированные расчетные перемещения при затыловании червячной или цилиндрической фрезы с винтовыми канавками, соответственно:

1 об. фреза $\rightarrow z(1 + P / T)$ об. кулачка;

1 об. фрезы $\rightarrow z(1 + S / T)$ об. кулачка.

3.2. Затачивание и восстановление режущей способности фасонных фрез по передней поверхности после затупления

Износ и определение величины снимаемого припуска

Основным видом износа фасонных затылованных фрез является износ по задней поверхности на величину h_3 (рис. 3.7). Затачивание фрез с затылованными зубьями осуществляется по передней поверхности. Поэтому толщина слоя металла, снимаемого за одно затачивание, мм [35]:

$$h = h_3 + \Delta h, \quad (3.2)$$

где Δh – дополнительный слой на переточку в пределах 0,1–0,2 мм.

Наиболее вероятным является припуск на заточку для черновых фрез от 0,3 до 0,5 мм, для чистовых фрез от 0,15 до 0,20 мм. Хотя для некоторых черновых фрез толщина слоя при затачивании достигает 1 мм.

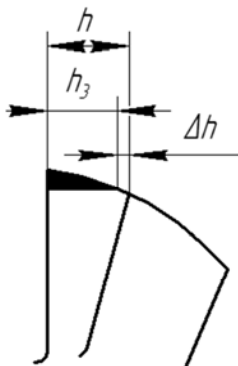


Рис. 3.7. Схема износа и перетачивания зуба фрезы

Схемы затачивания фрез

Фасонные фрезы с затылованными зубьями затачивают по передней поверхности кругами тарельчатого или чашечного типа при установке фрезы в центрах или на оправке, связанной со шпинделем делительного устройства (делительной головки) на универсально-заточных, специализированных заточных (для заточки червячных фрез) или шлифшлифовальных станках, в том числе и с ЧПУ. При этом величина переднего угла и после заточки должна отклоняться от заданного значения не более чем на $\pm 1^\circ$, так как изменение переднего угла вызывает искажения фасонного профиля.

Фрезы с прямыми канавками затачивают плоской стороной чашечного (тарельчатого) круга (рис. 3.8, а), а фрезы с винтовыми канавками — его конической стороной (рис. 3.8, б). Второй способ заточки уменьшает риск подрезки передней винтовой поверхности зубьев у вершины.

Установка круга относительно затачиваемой фрезы зависит от величины переднего угла затачиваемого инструмента и рабочей поверхности тарельчатого круга (рис. 3.9, а, б, в).

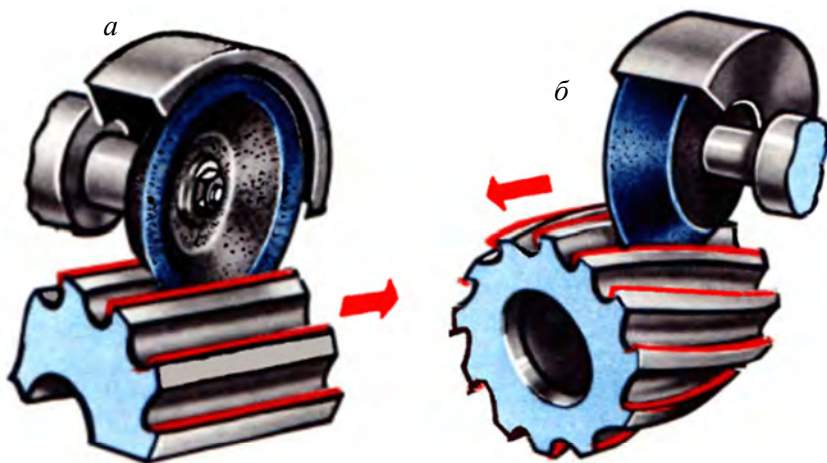


Рис. 3.8. Схема заточки фрезы по передней поверхности:
а – плоской стороной чашечного круга, *б* – конической стороной круга

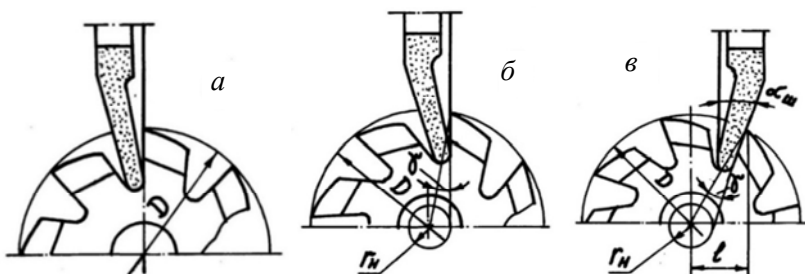


Рис. 3.9. Схемы установки шлифовальных кругов при заточке передней (*а*, *б*, *в*) поверхности фрезы

При значении переднего угла $\gamma = 0$ торец шлифовального круга располагается в осевой плоскости (рис. 3.9, *а*), при $\gamma \neq 0$ торец круга смещается параллельно осевой плоскости на величину (рис. 3.9, *б*):

$$r_n = \frac{D}{2} \cdot \sin \gamma, \quad (3.3)$$

где D – диаметр фрезы, на котором задана величина переднего угла γ .

При затачивании передней поверхности конической поверхностью круга с углом $\alpha_{\text{ш}}$ образующей конуса (рис. 3.9, в) смещение наиболее удаленной точки профиля равно:

$$l = \frac{D}{2} \cdot \sin(\gamma + \alpha_{\text{ш}}), \quad (3.4)$$

где $\alpha_{\text{ш}}$ – угол профиля шлифовального круга.

4. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СХЕМ ШЛИФОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ФРЕЗЫ ПРИ ЗАТЫЛОВАНИИ

Затылование шлифованием зубьев фасонных фрез является наиболее трудоемкой, сложной и ответственной операцией, на которой достигается требуемая точность и качество изготовления инструмента.

В производстве получили применение три метода шлифования профиля сложнопрофильных фрез: 1-й – чашечным коническим кругом (рис. 4.1, а), 2-й – пальцевым кругом (рис. 4.1, б) и 3-й – фасонным дисковым однорезцовым (рис. 4.1, в) или многорезцовым (рис. 4.2) кругом. В двух последних случаях шлифовальные круги заправляют соответственно профилю шлифуемых фрез.

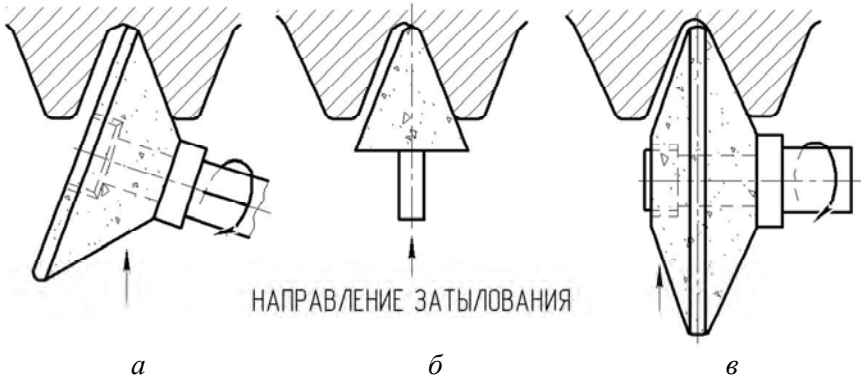


Рис. 4.1. Схемы затылования шлифованием зубьев, на примере червячной модульной фрезы



Рис. 4.2. Затылование червячной фрезы цилиндрическим шлифовальным кругом с заправленным профилем на токарно-затыловочном станке

Наибольшие проблемы при выборе метода затылования связаны с точностью получаемого профиля и производительностью операции. Это актуально для фрез с винтовыми зубьями (такими, как червячные, особенно в случае, когда угол подъема $\omega > 5^\circ$).

При шлифовании зубьев червячной фрезы дисковым шлифовальным кругом, заправленным по прямой, профиль зуба фрезы в осевом сечении получается криволинейной формы. Профиль зуба срезается у головки и основания зуба и имеет форму выпуклой кривой. Наибольшие значения искажения профиля зуба фрезы Δf наблюдается на основном цилиндре (рис. 4.3). Искажение профиля зуба по его длине неодинаковое: чем дальше по длине зуба от его передней грани, тем больше искажение профиля. В наиболее удаленных участках образуется седловина по длине зуба с утолщением ножки. С увеличением диаметра шлифовального круга размеры «седловины» по длине зуба увеличиваются.

Для фрез модулем $m = 5\text{--}10$ мм обычно применяют шлифовальные круги диаметром не более 100–120 мм. Величина искажения профиля зуба также зависит от угла подъема винтовой линии ω . Для углов подъема ω до $4\text{--}5^\circ$, как показали исследования и производственный опыт величиной погрешности профиля можно прене-

бречь. При $\omega > 5^\circ$ профиль круга необходимо заправлять по кривой, координаты которой определяются аналитически. На основании этого расчета проектируют шаблоны и правку шлифовального круга по кривой производят по копирам. В единичном и мелкосерийном производстве дисковые шлифовальные круги правят по кривой с помощью составных алмазодержателей. В серийном производстве для правки кругов используют накатные ролики.

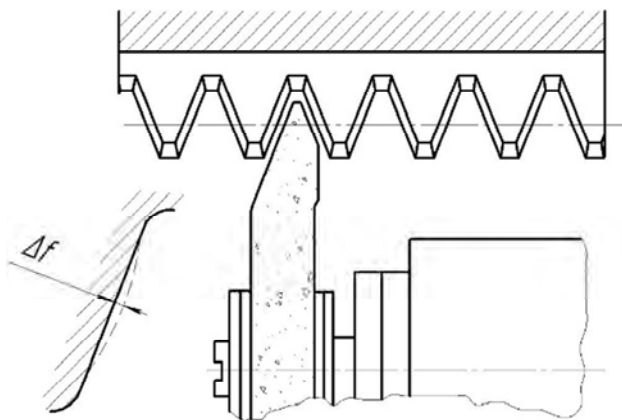


Рис. 4.3. Искажение профиля зуба фрезы при затыловании дисковыми шлифовальными кругами

В зависимости от модуля и степени точности червячной фрезы применяют различные схемы шлифования их профиля дисковыми кругами.

Червячные фрезы классов А, В, С модулем $m = 1-2$ мм шлифуют одновременно по диаметру и по профилю двухвитковым шлифовальным кругом или одновитковым кругом с образованием радиусов на вершинах.

Фрезы $m = 2,5 - 6$ мм шлифуют последовательно по диаметру, по профилю впадины и радиусам на вершинах или одновременно по диаметру, профилю витка и радиусам на вершинах.

Фрезы $m = 6-12$ мм шлифуют последовательно по диаметру, правой и левой сторонам профиля и радиусам на вершинах или с совмещением шлифования по диаметру и по радиусам на вершинах (рис. 4.6, а, б).

Высокое качество получается при затыловании шлифованием червячных фрез пальцевым кругом. Профиль практически не искажается, однако широко применения этот метод не нашел из-за больших трудностей получения на малых диаметрах пальцевых шлифовальных кругов требуемых скоростей резания (порядка 25–30 м/с). Рекомендуется этот метод для крупномодульных червячных фрез с $t \geq 6$ мм.

Метод затылования червячных фрез чашечным коническим кругом является промежуточным по точности между вторым (рис. 4.1, б) и третьим (рис. 4.1, в) случаями. Контакт поверхностей шлифовального круга и зуба приближается к прямой линии, поэтому искажение профиля зубьев получается намного меньше, чем при затыловании дисковым шлифовальным кругом. Чашечными кругами с углом профиля 35–37°, диаметром не более 70–80 мм затыловывают червячные фрезы $t = 2,5–8$ мм.

Для получения требуемой точности червячные фрезы классов ААА и АА $t \leq 4$ мм рекомендуется шлифовать дисковым кругом, $t = 4,5–6$ мм – чашечным и $t = 6–10$ мм – пальцевым.

При отсутствии винтообразности зуба и наличии не глубокого профиля безальтернативным остается метод затылования фасонным цилиндрическим (дисковым) кругом (рис. 4.1, в). Наряду с высокой точностью обработки, спрофилированные дисковые шлифовальные круги обладают наибольшей производительностью, не требуют переналадки при затыловании, обеспечивают хорошие показатели стойкости и общего ресурса после правки.

Для выполнения операции затылования стремятся выбрать круг наибольшего диаметра. Он требует меньше правок в ходе работы, что повышает точность профиля затылуемого инструмента, увеличивает общий ресурс круга. Для обеспечения заданной скорости резания порядка 25–30 м/с нет необходимости в увеличении частоты вращения шпинделя станка, которая при малом диаметре круга может быть не реализована по техническим причинам.

Однако при использовании больших кругов часто не удается получить затылок, прошлифованный по всей длине зуба инструмента, т. к. в конце рабочего хода круг может задеть соседний зуб. Недобег круга часто приводит к образованию «седла» на зубе (рис. 4.4). В результате получаем меньшее число переточек изготовленной фрезы и сокращенный срок службы.

Для фрез со шлифованным профилем решить эту проблему позволяет двойное затылование зубьев, которое устраняет увеличенный по высоте и по сторонам непрошлифованный участок зуба. Нешлифованный участок подвергают затылованию резцом до операции шлифования с помощью кулачка, величину спада K_1 которого делают в 1,2–1,75 раза больше величины спада кулачка K для шлифованной части (рис. 4.5).

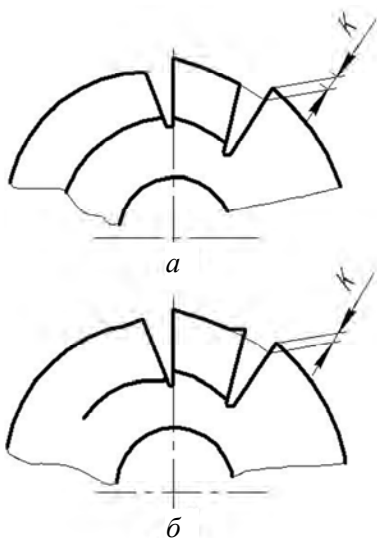


Рис. 4.4. Правильный (а) и неправильный седлообразный (б) спады затылка у фрез

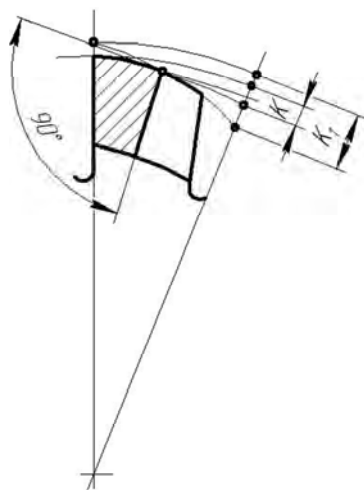


Рис. 4.5. Схема затылка при двойном затыловании

Точность затылования шлифованием зависит от установки шлифовального круга относительно шлифуемого профиля и его правки с использованием имеющихся для этой цели приспособлений.

При затыловании фрез шлифовальным кругом скорость вращения фрез выбирают в пределах 1–4 м/мин. Радиальная подача при черновом шлифовании 0,01–0,06 мм/об, при чистовом 0,002–0,008 мм/об. Число рабочих ходов при черновом фрезеровании изменяется от модуля и припуска на заточку в пределах $i = 5–21$, при чистовом – $i = 5–11$.

5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЗАТОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОПЕРАЦИЮ ЗАТЫЛОВАНИЯ ФАСОННОЙ ФРЕЗЫ

Известные методы расчета операции затылования не всегда обеспечивают выбор оптимального диаметра шлифовального круга с учетом изменяющихся параметров глубины фасонного профиля и угла впадины стружечной канавки фасонной фрезы.

Так рекомендуемый диаметр шлифовального круга для затылования задних поверхностей фасонных фрез определяется по формуле (5.1) [1; 2]:

$$D_{\text{кр.расч}} = \frac{D_{\text{фр}}}{2} \cdot \sin \frac{180}{z} \cdot \frac{1}{\sin \alpha_a}, \quad (5.1)$$

где $D_{\text{фр}}$ – диаметр затачиваемой фрезы, мм;

z – число зубьев фрезы;

α_a – задний угол затылуемой задней поверхности.

Расчет диаметра круга по формуле (5.1) дает приблизительный результат, проверку которого осуществляют опытным путем, как и выбор круга возможно большего диаметра, обеспечивающего допустимую длину затылования.

Наименьший и наибольший диаметр шлифовального круга проверяется также прочерчиванием (рис. 5.1). Архимедову спираль задней поверхности можно заменить дугой окружности с центром в точке O_1 . Точка O_1 находится на прямой, проведенной из точки A под углом α_a к передней поверхности рассматриваемого зуба (при $\gamma = 0$) или к радиусу фрезы AO . Из точки A радиусом наружной окружности фрезы необходимо провести засечку на линии, проведенной под углом α_a и получить точку O_1 . Из центра O_1 , радиусом $R_{\Phi} = \frac{D_{\Phi}}{2}$, провести дугу окружности AF . На передней поверхности следующего зуба (при $\gamma = 0^\circ$) получим величину затылования K по формуле (5.2):

$$K = \frac{\pi D_{\Phi}}{z} \cdot \text{tg} \alpha_a. \quad (5.2)$$

Принимая большие или меньшие значения радиуса круга, можно сделать несколько таких построений и выбрать наиболее подходящее значение радиуса шлифовального круга $R_{кр}$. Производственным опытом, расчетами и экспериментами установлено, что наибольшее число переточек фрезы по передней поверхности, при правильно выбранном критерии износа, а следовательно и максимальный срок службы фрезы будет в том случае, когда шлифованная часть зуба будет иметь длину равную длине зуба по дуге наружного диаметра фрезы. Принятым по этим рекомендациям радиусом $R_{кр}$ из центра X_i необходимо провести окружность, касательную к окружности впадины профиля зуба. Это контрольное прочерчивание гарантирует отсутствие врезания в следующий зуб. Во избежание седловины на остальной нешлифованной части зуба, фреза (до термической обработки) затылуется резцом на величину: $K_1 = (1,2-1,7) K$.

Использование этого метода без современных средств параметрического 3D-моделирования становится трудоемким и неточным способом решения поставленной задачи, не позволяющим оценить точность 2D-построений на реальном фасонном профиле фрезы.

Поиск решения дифференциально-геометрическими методами при помощи векторно-матричного расчета представляет определенную проблему в связи со сложностью математического описания ИИП шлифовального круга и траектории его перемещения при формообразовании неперегачиваемой затылованной задней поверхности инструмента [7; 15; 16]. Наличие пространственных ограничений на конечное положение круга при заточке приводит к необходимости составлять и решать системы дифференциальных уравнений, описывающих сопрягаемые поверхности шлифовального круга и затылуемой поверхности с учетом накладываемых ограничений. Разные затачиваемые профили, траектории и поверхности затылования требуют составления различных математических моделей и не имеют явного графического представления для анализа точности расчета положения, размеров и формы кругов для затылования, что затрудняет их применение на этапе подготовки производства.

Альтернативой для решения широкого спектра конструкторско-технологических задач оптимизации производства фасонных затылованных фрез является использование компьютерных систем, поддерживающих параметрическое 3D-моделирование. Использование современных САПР позволяет работать с моделью проектируемого

объекта с момента эскизной проработки проекта до внедрения его в серию. При этом существует возможность безболезненного редактирования ее на любом этапе подготовки производства с автоматическим изменением всех сопутствующих процессов. Работа с моделями позволяет качественно визуализировать результаты моделирования, проводить виртуальные испытания.

Исходя из очевидных преимуществ компьютерного моделирования для решения конкретных задач проектирования и производства инструмента, необходимо разработать методику оптимизации операции затылования фасонных фрез.

6. МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАТЫЛОВАНИЯ ФАСОННОГО ПРОФИЛЯ ИНСТРУМЕНТА

Анализ существующих технических решений и методов изготовления сложнопрофильных затылованных фрез (дисковых фасонных, червячных, резьбовых, цилиндрических многониточных) показал, что в целях оптимизации конструкции и технологии производства рассматриваемого инструмента необходимо использовать возможности компьютерного 3D-моделирования для выбора оптимальных параметров шлифовального круга, применяемого для затылования задней поверхности зуба фрезы. Моделирование операции заточки инструмента методом затылования позволяет выбрать оптимальный диаметр, форму, профиль и положение шлифовального круга, что, в свою очередь, дает возможность эффективно решать задачи экономии материальных ресурсов на изготовление фрез и увеличения срока службы изготавливаемого инструмента. Возникает возможность еще на этапе проектирования проводить анализ конструкции фрезы с точки зрения увеличения числа зубьев, изменения размеров стружечной канавки и самого зуба с точки зрения не только возможности размещения стружки и допустимой прочности зуба, но и возможности его изготовления на существующем заточном оборудовании (токарно-затыловочных, шлифовально-затыловочных, резьбошлифовальных станках).

Разработанная методика моделирования условий затылования фасонных фрез с использованием современных САПР [18] основана

на построении окружностей, образующих наружный контур профиля шлифовального круга, касательных к образующей затылка зуба в выбранном радиальном сечении и проходящих через соответствующую точку профиля на передней поверхности соседнего зуба (рис. 6.1, 6.2).

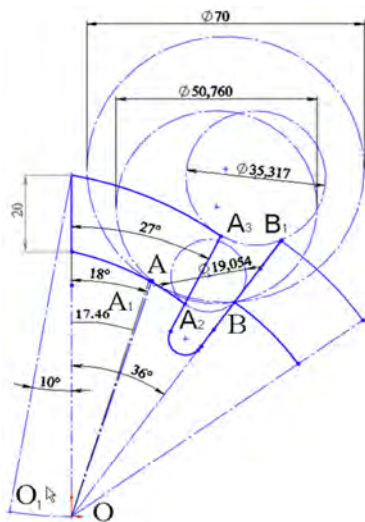


Рис. 6.1. Выбор диаметра круга для затылования дисковой фрезы модулем $m = 8$ мм

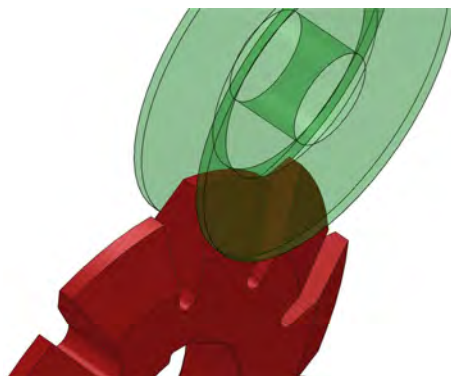


Рис. 6.2. 3D-модель операции шлифования затылка зуба фрезы на $2/3$ длины кругом $\varnothing 50,8$

Реализация предложенного метода рассмотрена на примере затылования шлифованием дисковой фрезы $\varnothing 180$, числом зубьев $z = 10$ и высотой трапецидального профиля $h = 20$ мм, применяемой для предварительной обработки зубчатого венца модулем $m = 8$ мм.

В результате моделирования получены окружности, обеспечивающие различные условия затылования (рис. 6.1): $\varnothing 19$ – диаметр шлифовального круга для полного затылования образующей основания зуба без зареза следующего; $\varnothing 35,3$ – круг, обеспечивающий полное затылование внешней образующей зуба; $\varnothing 50,8$ – *оптимальный круг*, полученный в результате построения, при условии затылования шлифуемого зуба на $66,7\%$ ($2/3$) длины без зареза следующего; $\varnothing 70$ – диаметр круга, полученный в результате расчета по

формуле (5.1) обеспечивающий затылования 64,7 % длины зуба без зареза смежного.

На рис. 6.1 представлены следующие базовые и опорные точки построенной модели процесса затылования: O – центр окружности, образующей наружный диаметр фрезы; O_1 – центр окружности, образующий след задней затылованной поверхности зуба фрезы; A – точка окончания затылования кругом $\varnothing 50,8$ на $2/3$ длины зуба без зареза следующего зуба; A_1 – точка окончания затылования кругом $\varnothing 70$ на максимальную длину без зареза следующего зуба; A_2 – точка окончания полного затылования зуба фрезы у основания зуба кругом $\varnothing 19$ без зареза следующего зуба; A_3 – точка окончания полного затылования зуба фрезы у вершины зуба кругом $\varnothing 35,3$ без зареза следующего зуба; B, B_1 – опорные точки следа передней поверхности смежного зуба фрезы.

Путем геометрических построений с использованием векторных САПР можно точно определить наибольший диаметр круга, который сможет шлифовать не менее $2/3$ длины зуба, не зарезав следующий, а также определить крайнее положение круга выбранного диаметра при затыловании (рис. 6.1). Полученный эскиз средствами компьютерного 3D-моделирования преобразуется в точный профиль фасонного круга. Анализ параметров сопряжения моделей фрезы и круга в условиях, имитирующих процесс резания, позволяет выбрать оптимальную форму, размеры и положение круга, обеспечивающие необходимую производительность и стойкость как режущего, так и затылующего инструмента, при сохранении точности обработки без зареза смежных зубьев. Так получена 3D-модель операции оптимального шлифования затылка зуба фрезы кругом $\varnothing 50,8$ на $2/3$ длине без зареза смежного зуба (рис. 6.2).

3D-моделирование позволяет наглядно представить и оценить разработку, а также рассмотреть варианты ее модернизации.

7. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОЦЕНКИ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ

При выборе диаметра шлифовального круга для затылования не всегда экономически целесообразным будет круг, обеспечивающий затылование на максимально возможную длину зуба. В ряде случаев, особенно при малом окружном шаге, поиск такого круга приводит к уменьшению его размера до недопустимого с точки зрения технических характеристик станка. Часто уменьшение диаметра круга не влечет за собой пропорционального увеличения длины затылования и связанного с ним роста общего ресурса фрезы, определяемого суммарным количеством переточек. Таким образом, при выборе диаметра круга необходимо учитывать не только геометрическую оптимизацию диаметра заточного инструмента, но и технико-экономическую составляющую его выбора. Поправку на данные условия производства и эксплуатации фасонной фрезы может дать показатель, учитывающий отношение ресурса шлифовального круга (количество правок) и ресурса затылуемой фрезы (количество переточек) и связанных с ними удельных затрат на заточку и эксплуатацию инструмента. Применение такого оценочного показателя позволит принимать компромиссные решения в случае неопределенности при выборе размеров шлифовальных кругов.

Компьютерный анализ диаметров кругов и длин затылования позволяет выбрать оптимальный круг с учетом *комплексного показателя операции затылования* рассчитанного по формуле (7.1):

$$k_3 = \frac{a \cdot k_1}{b \cdot k_2}, \quad (7.1)$$

где $k_1 = \frac{D_{\text{расч}}}{D_{\text{опт}}}$ – отношение диаметров D сравниваемых шлифовальных кругов;

$k_2 = \frac{l_{\text{опт}}}{l_{\text{расч}}} = \frac{\theta_{\text{опт}}}{\theta_{\text{расч}}}$ – отношение длин l (углов θ) затылования, полученных сравниваемыми кругами;

a – весовой коэффициент удельных затрат на операцию затылования;

b – весовой коэффициент удельных затрат на эксплуатацию затылуемого инструмента: $a + b = 1$.

При выборе круга минимального диаметра необходимо учитывать ограничения на высоту профиля, влияющую на возможность установки круга на станке, и максимальную частоту вращения шлифовального шпинделя, определяющую скорость резания.

8. ЭТАПЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ДЛЯ ЗАТЫЛОВАНИЯ ЗАДНИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ПРОФИЛЬНОЙ ФРЕЗЫ

С помощью компьютерного моделирования можно приобрести практические навыки определения оптимальных диаметральных размеров и профиля шлифовальных кругов для затылования задних поверхностей зубьев фасонных фрез, проанализировать данную операцию и дать рекомендации по усовершенствованию конструкции инструмента.

Основные и дополнительные исходные данные для моделирования шлифовального круга при затыловании профильной фрезы*.

В качестве исходных данных при моделировании шлифовальных кругов для затылования профильных фрез может выступать рабочий чертеж (модель инструмента) с заданными параметрами диаметра $D_{фр}$, числа зубьев z , формы, полной высоты H и высоты профиля h_0 (для зуборезных фрез определяемых модулем нарезаемого колеса m), заднего угла α_a (определяемого величиной затылования K), переднего угла γ , угла определяющего длину (толщину) зуба θ_1 и параметров стружечной канавки (центрального угла канавки θ_2 , угла спинки зуба, угла профиля канавки θ_k , глубины канавки и радиуса скругления у основания дна канавки r).

В случае анализа операции затылования на этапе проектирования и оптимизации конструкции фрезы необходимые данные принимаются на основании рекомендаций и типовых расчетов для рассматриваемой группы инструментов [1–3; 5].

Так центральный угол θ , соответствующий окружному шагу зубьев фрезы, при симметричном их расположении определяется по формуле (8.1):

$$\theta = \frac{360^\circ}{z}. \quad (8.1)$$

Центральный угол, определяющий окружную длину (толщину) зуба вдоль задней поверхности, рассчитывается по формуле (8.2):

$$\theta_1 = \frac{(252 - 288)^\circ}{z}. \quad (8.2)$$

Центральный угол, определяющий окружную длину стружечной канавки, рассчитывается по формуле (8.3):

$$\theta_2 = \frac{(108 - 72)^\circ}{z}. \quad (8.3)$$

При этом для получения равномерного окружного шага должно выполняться условие (8.4):

$$\theta = \theta_1 + \theta_2. \quad (8.4)$$

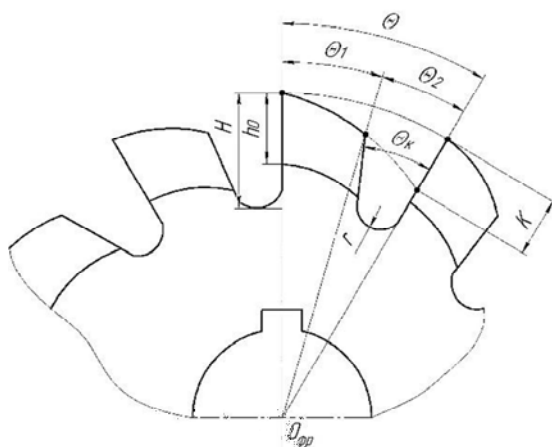


Рис. 8.1. Геометрия зуба и стружечной канавки фрезы

Полная высота зуба затылованной фрезы определяется по формуле (8.5), мм:

$$H = h_0 + K + r, \quad (8.5)$$

где h_0 – высота профиля на обрабатываемом изделии, мм;

K – величиной затылования, мм;

r – радиус закругления у основания (дна) канавки, мм: $r = (1-5)$ мм.

Полная высота зуба затылованной дисковой фрезы для нарезания зубчатых колес определяется по формуле (8.6), мм:

$$H_{\text{д}} = h_0 + K + (0,5 - 1,5), \quad (8.6)$$

где h_0 – высота профиля зуба, мм.

Полная высота зуба (глубина стружечной канавки) затылованной зуборезной червячной фрезы со шлифованным профилем определяется по формуле (8.7), мм:

$$H_{\text{ч}} = h_0 + \frac{K + K_1}{2} + (1 - 1,5), \quad (8.7)$$

где K_1 – величина дополнительного затылования, мм:

$$K_1 = (1,2 - 1,5)K.$$

Угол профиля стружечной канавки дисковых и червячных зуборезных фрез принимается в диапазоне: $\theta_{\text{к}} = (25-30)^\circ$.

Радиус закругления у основания дна канавки r должен обеспечивать плавный переход между спинкой и плоской передней поверхностью зуба и свободное размещение стружки.

Этапы построения модели фрезы и шлифовального круга для его затылования.

1 этап. По принятым и расчетным данным* строим эскиз профиля зуба фрезы.

В рассматриваемом примере смоделирован профиль зуба и межзубой впадины дисковой зуборезной фрезы со следующими геометрическими параметрами (рис. 8.2): $D_{\text{фр}} = 140$ мм; $z = 14$; $m = 5,0$ мм; $\alpha_a = 11^\circ$; $\gamma = 5^\circ$; $\theta_1 = 18^\circ$; $\theta_2 = 7^\circ$; $\theta = 25^\circ$.

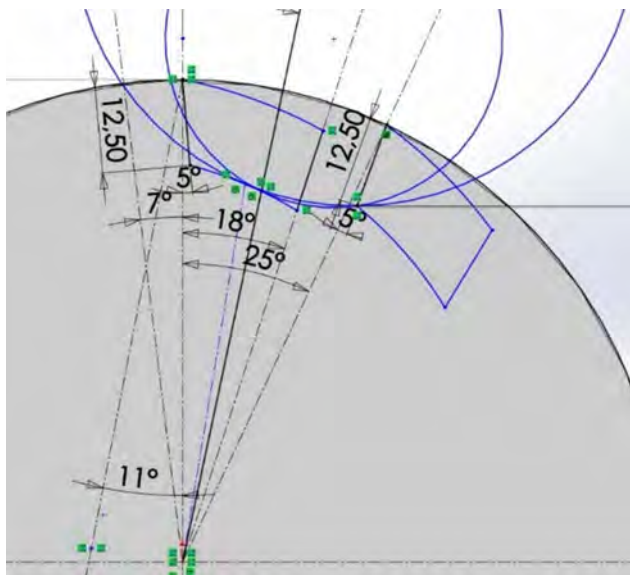


Рис. 8.2. Эскиз профиля зуба фрезы по расчетным данным, полученный в пакете программ компьютерного моделирования SolidWorks

По формуле (5.1) рассчитываем рекомендуемый диаметр $D_{\text{кр.расч}}$ шлифовального круга для затылования задних поверхностей зубьев фасонной фрезы.

В рассматриваемом примере:

$$D_{\text{кр.расч}} = \frac{140}{2} \cdot \sin \frac{180}{14} \cdot \frac{1}{\sin 11^\circ} = 81,63 \approx 82 \text{ мм.}$$

Расчет диаметра круга по формуле (5.1) дает приблизительный результат, проверку которого осуществляют опытным путем, как и выбор круга возможно большего диаметра, обеспечивающего допустимую длину затылования.

Окружность, равную расчетному диаметру шлифовального круга, полученному по формуле (5.1), размещаем на эскизе так, чтобы своей образующей она касалась линии затылования, проходящей через нижнюю опорную точку профиля затачиваемого зуба, и одновременно проходила через нижнюю опорную точку профиля следа передней поверхности смежного зуба (рис. 8.3).

Линия, проходящая через центр вращения фрезы и точку касания круга с затылуемой задней поверхностью, позволяет определить угол затылования (длину затылования) зуба фрезы (рис. 8.3).

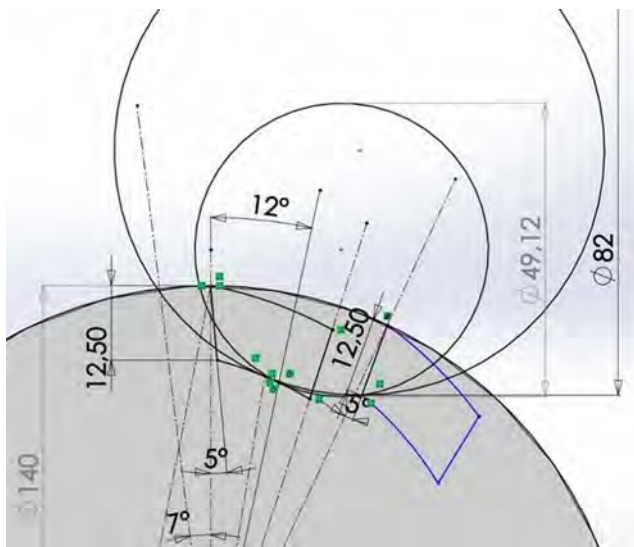


Рис. 8.3. Диаметры расчетного $d_{шф.р}$ и смоделированного $d_{шф.онт}$ шлифовальных кругов

Для определения максимального диаметра круга, обеспечивающего наиболее полное затылование зуба, необходимо из центра фрезы в радиальном направлении провести линию, отстоящую от вершины зуба фрезы на расстояние, равное $2/3$ полной длины зуба.

Расчетный угол поворота профиля при затыловании:

$$\theta_{зат1} = \frac{2}{3} \theta_1. \quad (8.8)$$

В рассматриваемом примере:

$$\theta_{\text{зат1}} = \frac{2}{3} \cdot 18^\circ = 12^\circ.$$

Строим окружность, образующая которой одновременно проходит через нижнюю опорную точку профиля следа передней поверхности смежного зуба фрезы, точку пересечения построенной радиальной линии и линии затылования, проходящей через нижнюю опорную точку профиля затачиваемого зуба. При этом построенная образующая профиля круга должна касаться линии затылования в последней точке построения, а не пересекать ее. Построенная окружность будет иметь диаметр, соответствующий диаметру круга, обеспечивающего наиболее полное затылование зуба (рис. 8.3).

В рассматриваемом примере:

$D_{\text{кр.расч}} = 82$ мм – расчетный диаметр шлифовального круга.

$D_{\text{кр.опт}} = 49,12 \approx 50$ мм – диаметр шлифовального круга, полученный в результате моделирования (опытным путем) и обеспечивающий наиболее полное затылование зуба.

Анализ диаметров полученных кругов и ширины, получаемой задней затылованной поверхности при их использовании, позволяет выбрать оптимальный круг с учетом комплексного показателя операции затылования, учитывающего возможность установки круга на станке, ресурс шлифовального круга (скорость затупления и количество правок) и ресурс затылуемого зуба после заточки (количество переточек).

Выбор оптимального круга осуществляется на основе анализа следующих относительных коэффициентов, рассчитываемых по формулам (8.9) и (8.10).

Отношение диаметров расчетного и смоделированного шлифовальных кругов определяется по формуле (8.9):

$$k_1 = \frac{D_{\text{кр.расч}}}{D_{\text{кр.опт}}}. \quad (8.9)$$

В рассматриваемом примере: $k_1 = \frac{82}{50} \approx 1,6$, что соответствует 60 % изменению диаметра круга.

Отношение длин затылованных задних поверхностей, полученных смоделированным и расчетным шлифовальными кругами, определяется по формуле (8.10):

$$k_2 = \frac{l_{\text{опт}}}{l_p} = \frac{\theta_{\text{опт}}}{\theta_p}. \quad (8.10)$$

В рассматриваемом примере:

$$k_2 = \frac{10,99}{8,41} = \frac{12^\circ}{9,18^\circ} \approx 1,3, \text{ что соответствует } 30\% \text{-му изменению}$$

длины затылования кругами разного диаметра и приводит к уменьшению числа переточек при использовании круга с большим расчетным диаметром.

При этом $l_{\text{опт}} = 10,99$ мм – длина шлифованной части зуба при шлифовании кругом, имеющим диаметр, полученный опытным путем (при моделировании); $l_p = 8,41$ мм – длина шлифованной части зуба при шлифовании кругом, имеющим расчетный диаметр, полученный по формуле (5.1); $\theta_{\text{опт}} = 12^\circ$ – угол поворота профиля при затыловании смоделированным шлифовальным кругом; $\theta_{\text{опт}} = 9,18^\circ$ – угол поворота профиля при затыловании шлифовальным кругом, рассчитанным по формуле (5.1);

Диаметр шлифовального круга $D_{\text{кр.опт}} = 50$ мм, полученный в результате моделирования, обеспечивает увеличение ресурса фрезы, но снижает ресурс круга. В конечном счете, из двух возможных вариантов кругов мы принимаем круг, полученный расчетным путем $\varnothing 82$ вместо круга $\varnothing 50$ по следующим причинам:

1. При малом наружном диаметре шлифовального круга $D_{\text{кр.опт}} = 50$ мм и диаметре оправки $d_{\text{опр}} = 32$ мм на возможность установки круга на оправку играет роль глубина профиля круга, которая составляет не менее двойной высоты шлифуемого профиля зуба фрезы (см. далее расчет $d_{\text{опр}} = 32$ мм) в пересчете на диаметр круга.

Таким образом, минимальный диаметр круга по условию посадки на оправку (рис. 8.4) определяется по формуле (8.11):

$$D_{\min} = d_{\text{опр}} + 2h + p, \quad (8.11)$$

где $d_{\text{опр}}$ – диаметр оправки или посадочного отверстия круга, мм;

h – высота шлифуемого профиля, мм;

p – ширина зажимных фланцев, мм; $p = 15$ мм.

В рассматриваемом случае

$$D_{\min} = 32 + 2 \cdot 12,5 + (10 - 15) = (67 - 72) \text{ мм.}$$

$$D_{\text{кр.опт}} = 50 \text{ мм} < D_{\min} = (67 - 72) \text{ мм.}$$

и, следовательно, такой круг невозможно посадить на выбранную оправку.

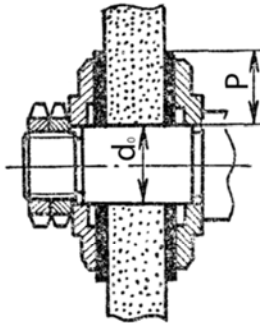


Рис. 8.4. Крепление шлифовального круга на оправке

2. Круг меньшего диаметра требует повышенной частоты вращения шпинделя станка для обеспечения заданной скорости резания, быстрее выйдет из строя из-за меньшей толщины тела, есть шанс неполно и некачественно заточить фрезу. Повышенный и неравномерный износ круга из-за большей разницы между окружными скоростями разновысотных точек профиля приведет к тому, что возможна правка заточного инструмента до полной обработки фрезы.

При любых других условиях (меньший диаметр оправки, использование шлифовальной головки вместо насадного шлифовального круга, меньшая глубина профиля круга, раздельное шлифова-

ние наружного диаметра и боковых поверхностей фрезы несколькими кругами) был бы выбран круг диаметром $D_{кр.опт} = 50$ мм, полученный в результате моделирования.

2 этап. С помощью кругового массива создается полный эскиз фрезы. Для обеспечения равномерного окружного шага принимаем угол $\theta = 25,71^\circ$ (рис. 8.5).

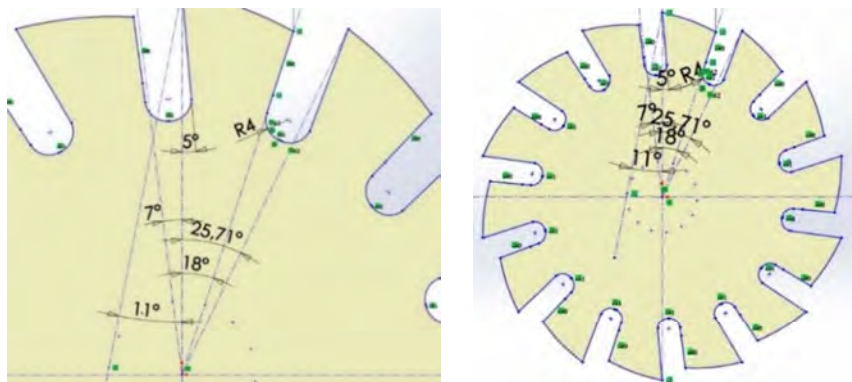


Рис. 8.5. Эскиз фрезы

3 этап. При помощи команды «Вытянутая бобышка/основание» вытягиваем эскиз для получения модели дисковой фрезы (рис. 8.6).

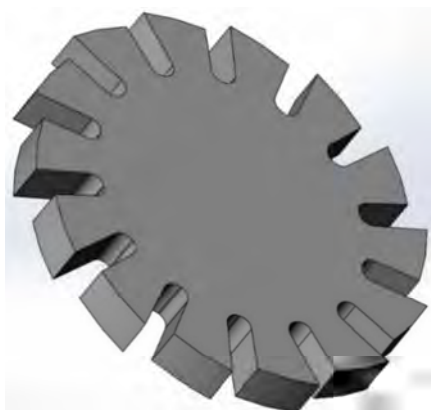


Рис. 8.6. Модель дисковой фрезы

4 этап. На осевой плоскости фрезы строим эскиз зуба и вытягиваем его в направлении линии затылования, используя команду «Вырез по траектории» (рис. 8.7, 8.8).

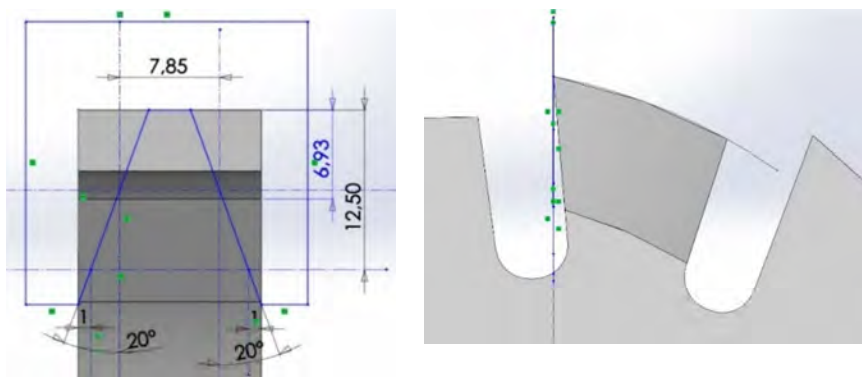


Рис. 8.7. Затылование зуба фрезы

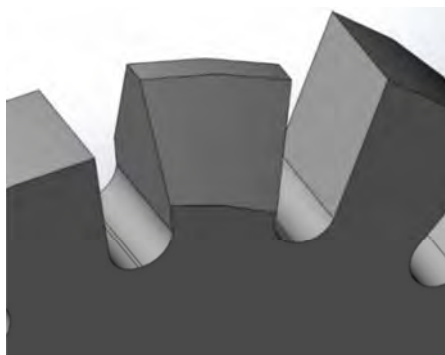


Рис. 8.8. Затылованный зуб фрезы

Расчет параметров фрезы для нарезания межзубой впадины шестерни приведен ниже.

Высота шлифуемого профиля головки зуба фрезы до делительного окружности рассчитывается по формуле (8.12):

$$h_a = 1,25 \cdot m. \quad (8.12)$$

Для рассматриваемого примера высота головки зуба фрезы (рис. 8.7):

$$h_a = 1,25 \cdot 5 = 6,25 \text{ мм.}$$

Толщина зуба черновой фрезы на делительном диаметре рассчитывается по формуле (8.13):

$$S = \frac{\pi \cdot m}{2} + \Delta S_y - \Delta S_\phi, \quad (8.13)$$

где ΔS_y – утоньшение зуба нарезаемого колеса для образования бокового зазора в передаче, мм. Данная величина зависит от модуля передачи и имеет значения в диапазоне 0,08–1,5 мм для фрез модулем 1–20 мм [2];

ΔS_ϕ – припуск под последующее чистовое фрезерование, мм.

Данная величина также зависит от модуля нарезаемого колеса и имеет значения в диапазоне 0,4–1,5 мм для фрез модулем 1–20 мм [2]. Для чистовой фрезы $\Delta S_\phi = 0$.

Толщина зуба моделируемой фрезы с учетом припуска под последующее шлифование колеса равного величине утоньшения зуба (рис. 8.7):

$$S = \frac{3,14 \cdot 5}{2} = 7,85 \text{ мм.}$$

Полная высота шлифуемого профиля зуба фрезы рассчитывается по формуле (8.14):

$$h_0 = 2,5 \cdot m. \quad (8.14)$$

Полная высота шлифуемого профиля зуба моделируемой фрезы (рис. 8.7):

$$h_0 = 2,5 \cdot 5 = 12,5 \text{ мм.}$$

Угол профиля фрезы, принимается равным углу профиля фрезеруемой шестерни: $\alpha = 20^\circ$.

5 этап. Круговым массивом задаем затылование для остальных зубьев, а также моделируем посадочное отверстие со шпоночным пазом (рис. 8.9).

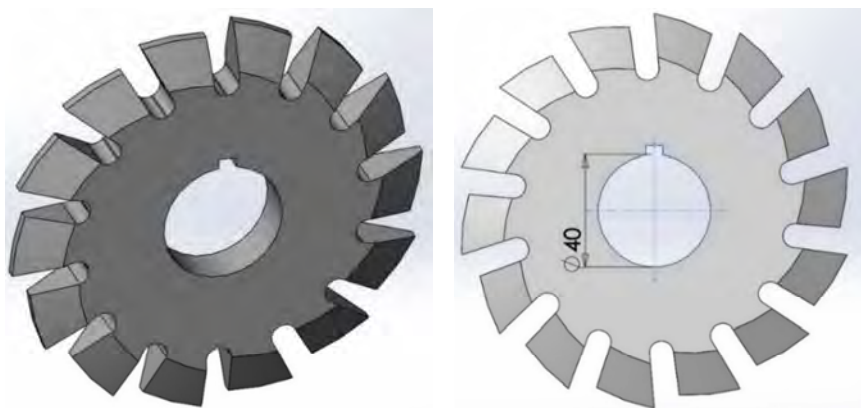


Рис. 8.9. 3D-модель затылованной фрезы с посадочным отверстием

6 этап. Через точку O_1 проводим прямую, соединенную с центром эскиза шлифовального круга. Создаем нормальную плоскость так, чтобы линия, проведенная из точки O_1 , лежала в ней (рис. 8.10).

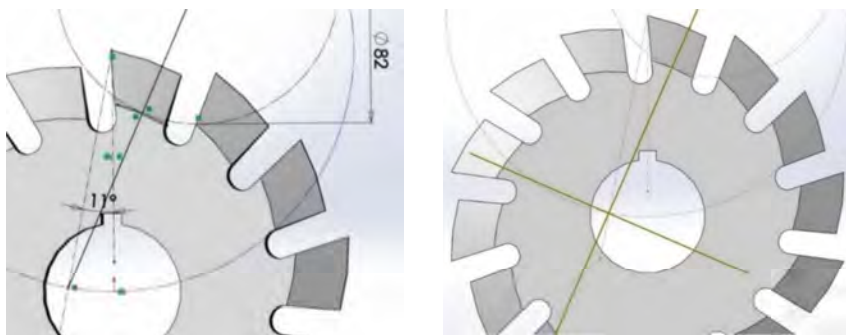


Рис. 8.10. Создание плоскости разреза фрезы

7 этап. По плоскости, полученной в пункте 6, делаем разрез. Создаем в новом документе эскиз шлифовального круга с выбранным ранее диаметром (рис. 8.11).

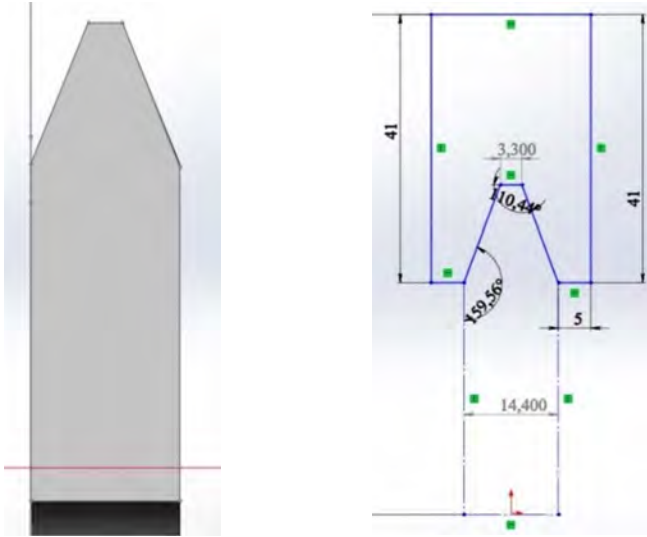


Рис. 8.11 Эскиз шлифовального круга

8 этап. С помощью команды поворота эскиза вокруг оси получаем модель шлифовального круга (рис. 8.12). В рассматриваемом примере диаметр посадочное отверстие круга $d_0 = 32$ мм, наружный диаметр круга $D_{кр.расч} = 82$ мм.



Рис. 8.12. Модель шлифовального круга

9 этап. Для контроля правильности построений создаем сборку из полученных моделей фрезы и шлифовального круга. Положение круга относительно фрезы определяется положением секущей плоскости, построенной на этапе 6 (см. рис. 8.10). Проверяем полученную сборку на наличие интерференции: пересечения сопряженных и смежных профилей фрезы и круга (рис. 8.13).

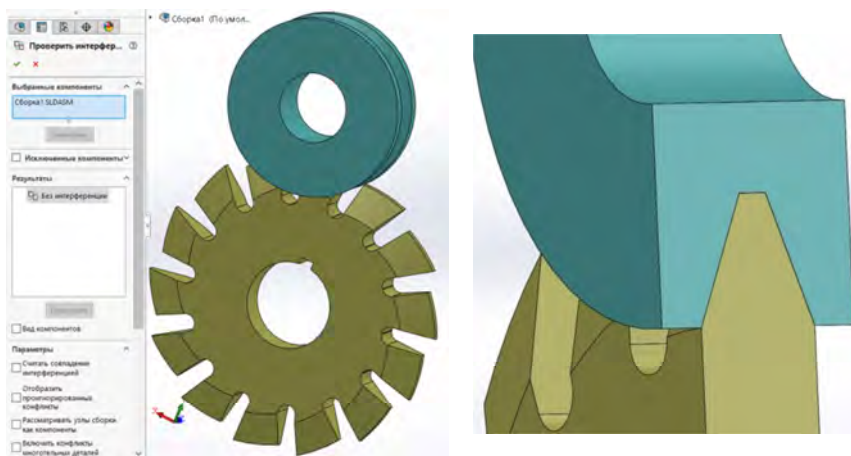


Рис. 8.13. Сборка дисковой фрезы и шлифовального круга

Выводы по результатам моделирования на основе приведенного примера представлены ниже.

В ходе построения, анализа и контроля модели фрезы и шлифовального круга для ее затылования был выбран диаметр шлифовального круга, соответствующий расчетному $D_{кр.расч} = 82$ мм, который обеспечивает наиболее оптимальную операцию заточки без зарезания соседнего зуба, и соответствует конструктивным параметрам затылуемой поверхности, а также обеспечивает затылование по длине зуба $l = 8,41$ мм на величину меньшую на 30 % относительно оптимальной длины затылка, что сокращает на 3 переточки общее количество заточек фрезы при съеме металла по передней поверхности до 1 мм за переточку. Альтернативный вариант заточки фрезы смоделированным кругом оптимального диаметра $D_{кр.опт} = 50$ мм

имеет ограничения по применению из-за малого диаметра, препятствующего возможности его установки на станке, и низкого ресурса из-за неравномерного износа и ограничений по числу правок.

Примеры исходных данных для моделирования операции затылования дисковой черновой зуборезной фрезы.

Таблица 8.1

Варианты заданий к компьютерному моделированию шлифовальных кругов для затылования дисковых зуборезных фрез

№ п/п	Диаметр фрезы $D_{фр}$, мм	Число зубьев z	Модуль m , мм	Задний угол $\alpha_a, ^\circ$	Передний угол $\gamma, ^\circ$
1	90	14	2,0	10	5
2	112	14	3,5	10	0
3	180	10	9,0	12	0
4	140	14	5,0	11	5
5	160	12	6,5	11	10
6	125	14	4,0	10	0
7	125	14	4,5	12	0
8	140	12	5,5	10	10
9	100	16	2,5	12	5
10	112	15	3,0	10	0
11	180	10	8,0	10	0
12	160	10	7,0	11	0
13	160	12	6,0	9	5
14	100	14	2,75	10	0
15	90	16	2,0	12	0
16	112	15	3,75	10	10
17	160	10	6,0	9	0
18	125	15	4,5	10	0
19	140	15	5,0	10	10
20	180	10	10,0	9	10
21	180	9	8,0	11	0
22	160	10	7,5	10	0

9. АПРОБАЦИЯ МЕТОДА 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

9.1. Моделирование шлифовальных кругов для заточки дисковой модульной фрезы, применяемой для предварительной обработки зубчатого венца $m = 8$ мм в деталях, производимых на ОАО «МТЗ»

Реализация предложенного метода моделирования процесса затылования для рассматриваемой фасонной фрезы подробно описана в разделах 6 и 8. Здесь в дополнение к определению диаметров и профилей шлифовальных кругов произведен анализ параметров сопряжения моделей фрезы и круга при шлифовании профиля зуба по всей длине в виде определения формы и величины зареза на следующем зубе (рис. 9.1, 9.2), а также величины «седла» при недорезе и его влиянии на количество возможных переточек после затупления инструмента (рис. 9.3, табл. 9.1) [36].

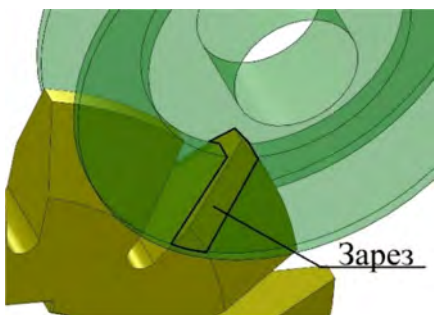


Рис. 9.1. Затылование зуба на полную длину с зарезом кругом $\varnothing 70$

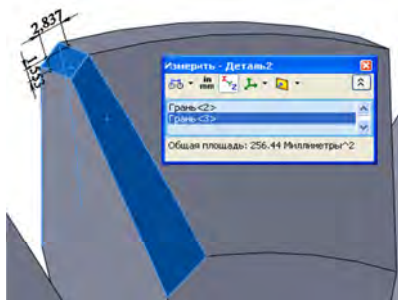


Рис. 9.2. Зарез следующего зуба за шлифуемым

Следует отметить, что при выборе круга минимального диаметра необходимо учитывать ограничения на высоту профиля, влияющую на возможность установки круга на станке, и максимальную частоту вращения шлифовального шпинделя, определяющую скорость резания.

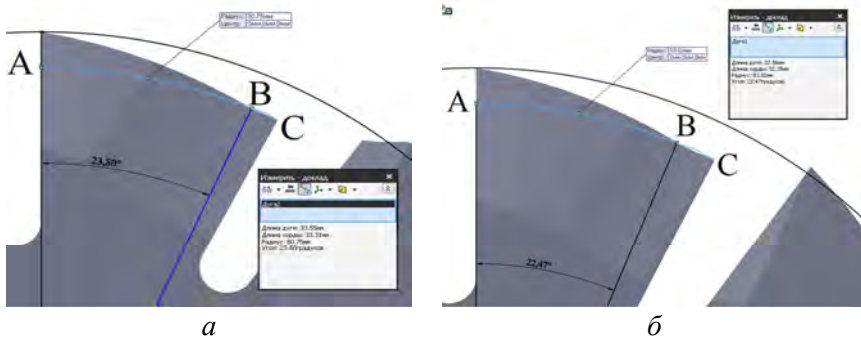


Рис. 9.3. Схема для анализа седлообразности при затыловании фрезы на максимальную длину зуба без зареза смежным кругом диаметра: $a - \text{Ø}50,8$; $b - \text{Ø}70$

Таблица 9.1

Седлообразность получаемая в результате затылования

Параметры затылования	Круг оптимального диаметра $D_{кр1}$, полученный моделированием	Круг, диаметр $D_{кр2}$ которого получен расчетным путем
Диаметр шлифовального круга D , мм	50,8	70
Припуск на шлифование, мм	1	1
	3	3
Площадь седлообразности на зубе S (мм ²) при заданном припуске на шлифование	775,75	818,72
	1029,7	1104,22
Спад затылка h , мм	5,784	5,901
	5,681	6,708
Допустимый угол переточки по параметру «седлообразности» на зубе, град	23,80	22,47

Выводы.

При полном затыловании зуба кругами, смоделированным $\varnothing 50,8$ и расчетным $\varnothing 70$, происходит резец следующего за ним зуба (рис. 8.1). В результате при использовании круга $\varnothing 70$ недопустимо искажается профиль фрезы и нарушается ее геометрия (задние углы) у передней поверхности зуба (рис. 9.2).

Несмотря на это при минимизации удельных затрат на операцию затылования и учете ограничений на характеристики затыловочного станка лучше принять фасонный круг $\varnothing 70$, обеспечивающий неполное затылование профиля зуба за один установ. При этом потеря ресурса затылуемой фрезы (количество переточек) составит 2 %, при увеличении ресурса шлифовального круга $\varnothing 70$ на 38 % по сравнению с кругом $\varnothing 50,7$.

Использование профильных кругов $\varnothing 19$ и $\varnothing 35,3$ обеспечивающих затылование по всей длине зуба, не приемлемо, т. к. глубина фасонного профиля таких кругов больше выбранных диаметров.

Анализ седлообразности показал, что нет необходимости в предварительном получении 2-го затылка резцом, как для шлифовального круга $\varnothing 70$, так и для круга $\varnothing 50,8$.

Компьютерный анализ диаметров кругов и длин затылования позволяет выбрать оптимальный круг с учетом комплексного показателя операции затылования, учитывающего отношение ресурса шлифовального круга (количество правок) и затылуемой фрезы после заточки (количество переточек).

Анализ результатов моделирования показывает, что на выбор диаметра круга влияет не только количество зубьев, но и высота профиля фрезы, принятая схема обработки (одним кругом или несколькими) и угол установки круга относительно шлифуемой поверхности.

9.2. Моделирование шлифовальных кругов для заточки фасонных многозубых насадных фрез для обработки пазов в статоре линейного шагового двигателя (ЛШД), изготавливаемого на ОАО «Планар»

Предложенный метод моделирования апробирован на фасонных насадных фрезах для обработки пазов в пластине из электротехнической стали, приклеенной к гранитной основе статора линейного двигателя ОАО «Планар» (рис. 9.4) [37].

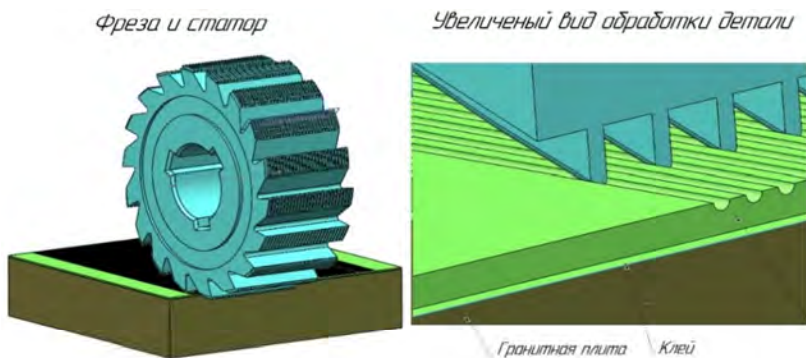


Рис. 9.4. Схема обработки статора фасонной фрезой

В результате моделирования получены диаметры шлифовальных кругов, обеспечивающие различные условия затылования многониточной насадной фрезой диаметром $D = 86$ мм, числом зубьев $z = 18$, углом стружечной канавки $\theta = 45^\circ$ (рис. 9.5, 9.6): $\varnothing 13,52$ – диаметр круга для полного затылования образующей основания зуба без зареза следующего; $\varnothing 27,5$ – круг, обеспечивающий полное затылование вершины зуба; $\varnothing 43$ – минимальный диаметр круга, полученный в результате расчета по формуле (5.1); $\varnothing 62,99$ – оптимальный круг, полученный в результате построения при условии шлифования затылка зуба на $2/3$ длины без зареза следующего зуба.

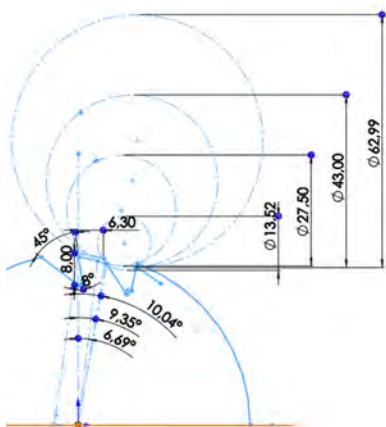


Рис. 9.5. Выбор диаметра круга

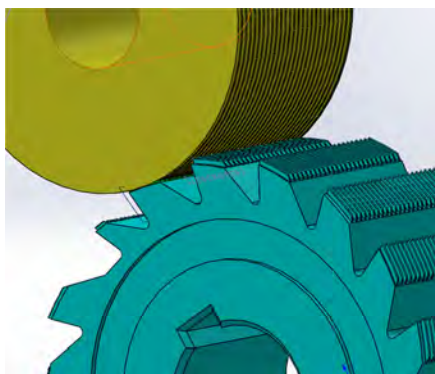


Рис. 9.6. Модель затылования фрезы с $z = 18$; $\theta = 45^\circ$ многониточным кругом $\varnothing 63$

Благодаря использованию предложенного метода 3D-моделирования произведен анализ влияния конструктивных параметров затylуемой фрезы таких как число зубьев z и угол стружечной канавки θ (рис. 9.7) на диаметр заточного круга (табл. 9.2).

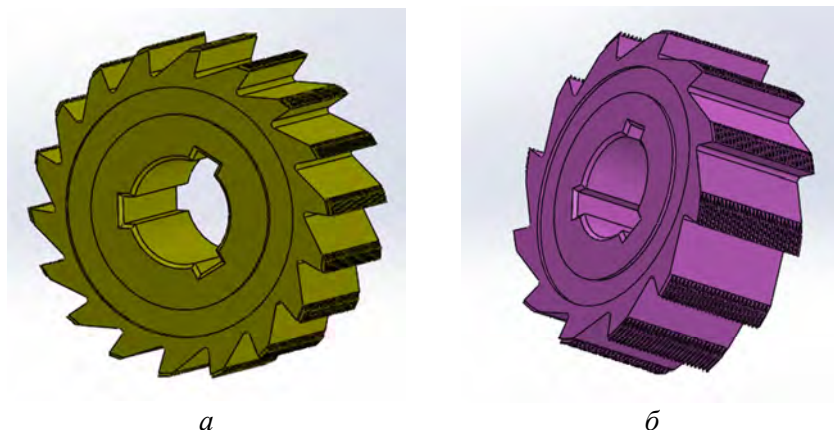


Рис. 9.7. Модели сравниваемых многозубчатых затylуемых фрез:
a – фреза с $z = 18$; *б* – фреза с $z = 12$

Таблица 9.2

Сравнительный анализ параметров фасонных фрез

Параметры фрез	Вариант конструктивного исполнения фрезы		
	$D = 86$ мм, $z = 12$, $\theta = 70^\circ$	$D = 86$ мм, $z = 18$, $\theta = 55^\circ$	$D = 86$ мм, $z = 18$, $\theta = 45^\circ$
1	2	3	4
Длина зуба вдоль задней поверхности на вершине, мм	4,6	2,58	6,3
Угол зуба по длине / Угол затylования на 2/3 длины зуба	$9^\circ/6^\circ$	$6,17^\circ/3,45^\circ$	$10,4^\circ/6,69^\circ$
Диаметр круга для полного затylования зуба по длине, мм	33,47	15,33	13,52

Окончание табл. 9.2

1	2	3	4
Диаметр круга, вычисленный по формуле (5.1), мм	64	43	43
Диаметр круга для затывлования 2/3 длины зуба, мм	80,5	65,53	62,99
Количество переточек, шт.	3	1	4

Расчет режимов резания для проектируемых фрез показал повышение производительности инструмента при увеличении числа зубьев с $z = 12$ до $z = 18$.

Суммарный путь, который пройдет фреза при обработке ЛШД в ходе резания:

$$L = 550 \cdot 10 \cdot 2 = 11\,000 \text{ мм.}$$

Скорость резания (вращения фрезы): $V_p = 30$ м/мин.

Расчетная частота вращения фрезы:

$$n_p = \frac{1000V_p}{\pi D};$$

$$n_p = \frac{1000 \cdot 30}{3,14 \cdot 86} = 110 \text{ мин}^{-1}.$$

Принятая частота вращения фрезы: $n_{пр} = 100 \text{ мин}^{-1}$.

Минутная подача стола станка при фрезеровании:

$$S_M = S_z z n_{пр},$$

где S_z – подача на зуб, мм/зуб;

$S_{M1}(z = 12) = 0,1 \cdot 12 \cdot 100 = 120$ мм/мин (фреза с числом зубьев $z = 12$);

$S_{M2}(z = 18) = 0,1 \cdot 18 \cdot 100 = 180$ мм/мин (фреза с числом зубьев $z = 18$).

Машинное (основное) время обработки фрезой за 2 прохода:

$$T_o = \frac{L}{S_M}.$$

$T_{01}(z = 12) = 11\,000 / 120 = 92$ мин (фреза с числом зубьев $z = 12$);

$T_{02}(z = 18) = 11\,000 / 180 = 61$ мин (фреза с числом зубьев $z = 18$);

Диаметр шлифовального круга для затылования фрезы рассчитанный по формуле (5.1):

$$D_{\text{кр.расч}}(z=12) = \frac{86}{2} \cdot \sin \frac{180}{12} \cdot \frac{1}{\sin 10} = 64 \text{ мм};$$

$$D_{\text{кр.расч}}(z=18) = \frac{86}{2} \cdot \sin \frac{180}{18} \cdot \frac{1}{\sin 10} = 43 \text{ мм}.$$

При этом диаметр рассчитанного шлифовального круга, как и диаметр смоделированного оптимального, уменьшается из-за увеличения числа зубьев, определяющих окружной шаг, и ограничений при выходе цилиндрического круга из-за возможности зареза смежного зуба при затыловании. Однако уменьшение угла стружечной канавки на 10° с $\theta = 55^\circ$ до $\theta = 45^\circ$ и использование для выбора шлифовального круга предложенного метода моделирования позволило применить круг $\text{Ø}63$, что на 20 мм больше расчетного.

Выводы.

1. Анализ режимов резания показал, что фрезы с числом зубьев $z = 18$ обеспечивают уменьшение машинного времени обработки на 33 % по сравнению с фрезами с $z = 12$.

2. Анализ параметров шлифовальных кругов для операции затылования фасонных фрез показал, что круги, полученные расчетом по формуле (5.1) имеют диаметры меньше смоделированных оптимальных на 25 % и 50 % для фрез с $z = 12$ и $z = 18$, соответственно.

3. Смоделированные круги, удовлетворяющие условию затылования на $2/3$ длины зуба, без зареза смежного зуба, имеют следующие стандартные диаметры: для фрез с $z = 12$, $D_{\text{кр}} = 80$ мм, для фрез

с $z = 18$, $D_{кр} = 63$ мм. Потеря ресурса шлифовального круга из-за уменьшения диаметра с $\varnothing 80$ до $\varnothing 63$ незначительна.

4. Фреза с $z = 18$ и углом стружечной канавки 55° имеет ограниченный ресурс, составляющий лишь одну переточку по передней поверхности после затупления. Одновременно у фрезы с $z = 18$ и углом стружечной канавки 45° растёт общий ресурс за счет увеличения числа переточек с 3-х до 4-х по сравнению с применяемой фрезой с $z = 12$.

5. Анализ конструктивных параметров, условий заточки и режимов резания показал, что фреза с $z = 18$ и $\theta = 45^\circ$ обеспечивает наилучшие проектные показатели.

6. Анализ результатов моделирования показывает, что на выбор диаметра круга влияет, кроме количества зубьев и заднего угла заточки фрезы, высота профиля и угол впадины стружечной канавки.

9.3. 3D-моделирование шлифовальных кругов и анализ операции затылования стандартных дисковых фрез модулем $m = 1-16$ мм

С целью определения оптимальных диаметров шлифовальных кругов, обеспечивающих заточку профиля зуба на $2/3$ длины, и сравнения условий заточки зубьев фрез кругами, рассчитанными по формуле (5.1), проведено моделирование операции затылования стандартных дисковых фрез модулем $m = 1-16$ мм [38].

В качестве примера, для фрез модулем $m = 2$ мм и $m = 8$ мм (рис. 9.8) построены круги: $\varnothing 3,4$ и $\varnothing 8,2$ – для полного затылования образующей основания зуба без зареза следующего; $\varnothing 6,7$ и $\varnothing 66,7$ – для полного затылования внешней образующей зуба; $\varnothing 22,9$ и $\varnothing 76,6$ – для затылования зуба на $2/3$ без зарезания следующего (оптимальные круги); $\varnothing 42,7$ и $\varnothing 111,2$ – рассчитанные по формуле (5.1).

Создание 3D-модели шлифовального круга для затылования модели дисковой фрезы, позволяет наглядно представить и оценить разработку, проанализировать ее точность, а также рассмотреть варианты ее модернизации (рис. 9.9, 9.10).

Так на рис. 9.9 представлена 3D-модель операции шлифования затылка зуба фрезы модулем $m = 2$ мм расчетным и оптимальным кругом на неполную длину, обеспечивающую отсутствие зареза смежного зуба.

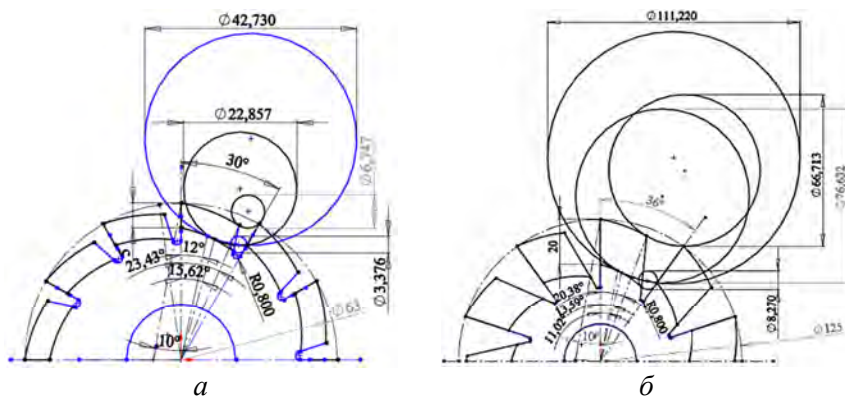


Рис. 9.8. Моделирование диаметра круга для затылования дисковой фасонной фрезы:
a – модулем $m = 2$ мм; *б* – модулем $m = 8$ мм

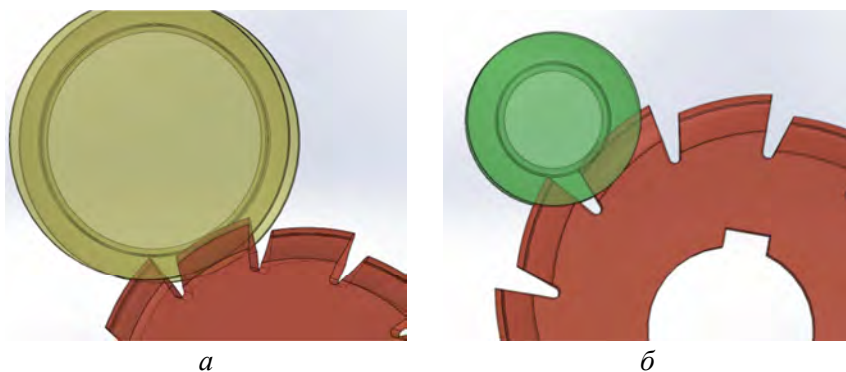


Рис. 9.9. 3D-модель затылования фрезы модулем $m = 2$ мм
при условии отсутствия зареза смежного зуба:
a – круг $\varnothing 42,7$ (расчетный) в момент шлифования зуба на 1/2 длины;
б – круг $\varnothing 22,9$ (смоделированный) при шлифовании 2/3 длины зуба

При затыловании фрезы расчетным и оптимальным кругами на всю длину зуба, происходит рез следующей за ним зуба (рис. 9.10–9.12). В результате недопустимо искажается профиль и нарушается геометрия у передней поверхности зуба фрезы. Площадь зареза фрезы $m = 2$ мм кругом оптимального диаметра на 40 % меньше, чем расчетным.

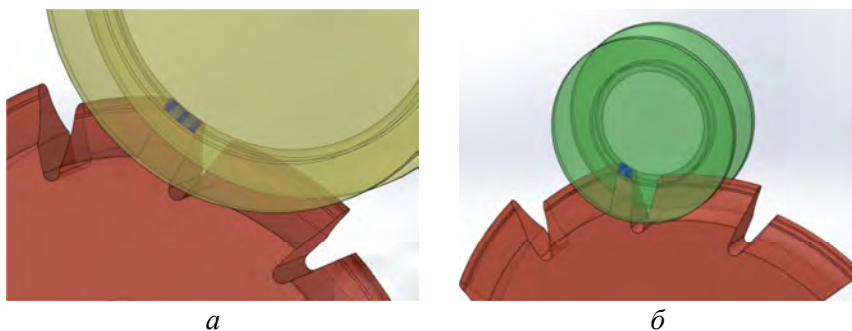


Рис. 9.10. 3D-модель затылования фрезы модулем $m = 2$ мм на всю длину зуба (зarez смежного зуба):
a – круг $\varnothing 42,7$ (расчетный); *б* – круг $\varnothing 22,9$ (модель)

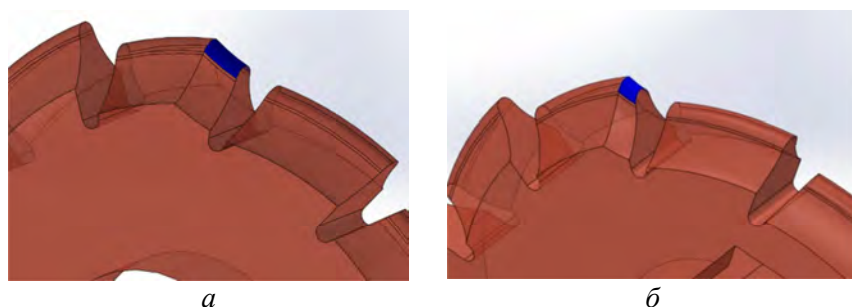


Рис. 9.11. Зarez при затыловании кругом расчетного (*a*) и оптимального (*б*) диаметра

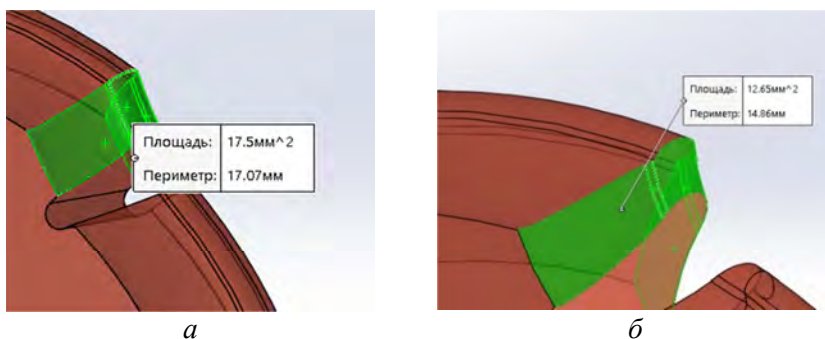


Рис. 9.12. Геометрические параметры зarezа при затыловании кругом расчетного (*a*) и оптимального (*б*) диаметра

Анализ результатов моделирования операции затылования дисковых модульных зуборезных фрез.

Оценка эффективности применения рассчитанных и смоделированных кругов осуществлена путем сравнения диаметров кругов и длин (углов) затылования при их использовании (рис. 9.13, 9.14).

Результаты 3D-моделирования подтвердили несостоятельность формулы (5.1) для определения диаметров шлифовальных кругов, обеспечивающих затылок зуба на $2/3$ длины, за исключением фрезы модулем $m = 6$ мм, для которой диаметр рассчитанного и смоделированного круга, как и длина затылования совпали (рис. 9.13).

В остальных случаях диаметр рассчитанного круга больше смоделированного. Разница диаметров достигает 2,5 раз при затыловании фрез модулем $m = 14$ мм. Длина участка затылования смоделированным кругом больше, чем рассчитанным, и разница этих длин достигает 75 % для фрез с $m = 16$ мм. Увеличение диаметра круга по сравнению с оптимальным (смоделированным) приводит к уменьшению длины затылования, но эта зависимость не прямо пропорциональная (рис. 9.14).

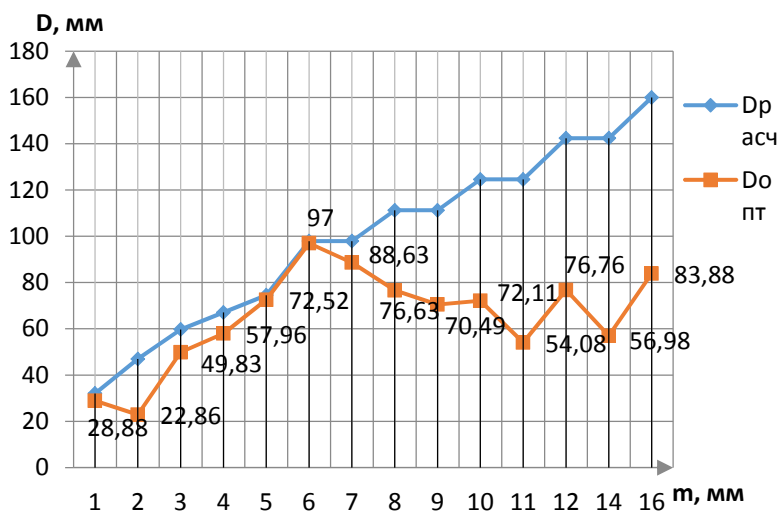


Рис. 9.13. Зависимость диаметра D шлифовального круга от модуля m фрезы: $D_{расч}$ – диаметр шлифовального круга (ШК) полученный по формуле (5.1); $D_{опт}$ – диаметр смоделированного (оптимального) ШК для затылования на $2/3$ длины зуба

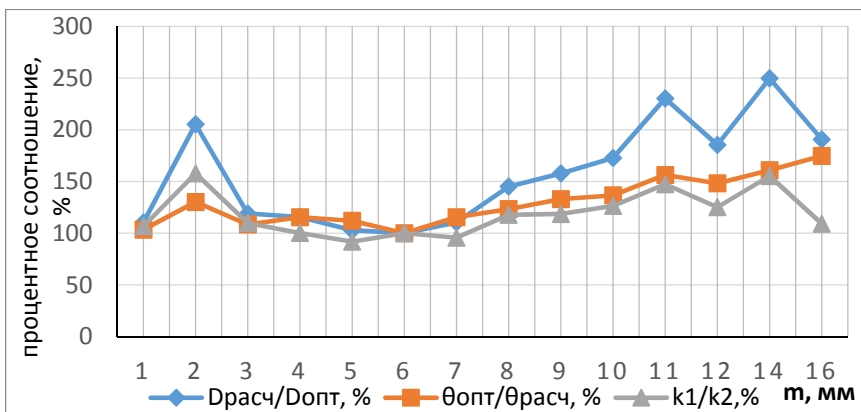


Рис. 9.14. График отношения диаметров кругов, длин затылования и коэффициента k их относительного влияния на операцию затылования для фрез модулем $m = 1\text{--}16$ мм

Анализ коэффициента k , отражающего отношения диаметров кругов k_1 и соответствующих им длин затылования k_2 , показывает неоднозначный отклик изменения длины затылования на изменение диаметра круга. Наименьший отклик наблюдается у фрез модулем $m = 2$ и 14 мм, наибольший у фрез модулем $m = 5$ и 7 мм. Прямо пропорциональная связь наблюдается только у фрез с модулем $m = 6$ мм.

При выборе диаметра шлифовального круга для затылования не всегда экономически целесообразным будет круг, обеспечивающий затылование на максимально возможную длину зуба. Эффект от его применения может не перекрыть издержки на операцию затылования из-за неравномерного выкрашивания профиля, требующего частой правки и дополнительного времени на настройку станка, а также малого суммарного ресурса шлифовального круга. В ряде случаев, особенно при малом окружном шаге и большой высоте зуба затылуемой фрезы, поиск диаметра круга, обеспечивающего максимальную длину затылования, приводит к получению недопустимых с точки зрения конструкции инструмента (глубины профиля и присоединительных размеров) и технических характеристик станка (диаметра оправки для установки круга и максимальной частоты вращения шпинделя) параметров. Так, исходя из сравнения расчетной глубины профиля и диаметра $D_{\text{опт}}$ смоделированного шлифовального круга для фрез модулем $m = 11; 14; 16$ мм, реализовать затылование

всего профиля невозможно. В этом случае допустимо раздельное шлифование по вершине зуба и боковым сторонам. Таким образом, при выборе диаметра круга необходимо учитывать не только геометрическую оптимизацию диаметра заточного инструмента, но и технико-экономическую составляющую его выбора. Так диаметр круга определяет не только его первичную стоимость, но и общий ресурс через допустимое количество правок и припуск на одну правку, связанную с равномерностью износа по высоте профиля. При этом затыловочные круги характеризуются переменной скоростью резания точек по высоте профиля, что вызывает неравномерный износ. Данные круги отличаются от стандартных, прямого профиля, увеличенным припуском на правку из-за значительного отклонения образующей профиля от оси. Чем меньше исходный диаметр круга, тем интенсивнее его износ и больше его разница в разных точках профиля, что может привести к преждевременной потере точности профиля фрезы при затыловании. Поправку на условия изготовления и эксплуатации фасонной фрезы может дать предложенный в разделе 6 *комплексный показатель операции затылования* k_z , учитывающий отношение диаметров сравниваемых кругов и отношение длин затылования, которые эти круги обеспечивают, и рассчитываемый по формуле (7.1).

Так при равенстве весовых коэффициентов a и b , выбирая диаметр шлифовального круга, следует ориентироваться на коэффициент k , значения которого для стандартных модульных фрез представлены на рис. 9.14. В случае преобладающего влияния стоимости операции затылования на стоимость фрезы при низких эксплуатационных расходах на затылуемый инструмент диаметр круга необходимо выбирать по формуле (5.1). В случае значительно большего влияния на цену эксплуатации фрезы цены восстановления и суммарного ресурса инструмента следует выбирать смоделированные круги, обеспечивающие оптимальную длину затылка зуба.

Анализ геометрии шлифовальных кругов подтверждает необходимость учета при выборе диаметра круга не только окружного шага θ (числа зубьев z) и диаметра затылуемой фрезы $D_{\text{фр}}$, но и высоты профиля зуба H с углом стружечной канавки θ_2 . Так дисковые фрезы модулем $m = 6$ и 7 мм, 8 и 9 мм, 10 и 11 мм, 12 и 14 мм имеют одинаковые диаметры $D_{\text{фр}}$ и число зубьев z , но разные диаметры кругов для затылования (рис. 9.13).

При проведении дополнительных построений на модели фрезы диаметром $\varnothing 140$ с числом зубьев $z = 10$ (аналог фрезы модулем $m = 10$ мм) установлено, что при увеличении угла стружечной канавки θ_2 (рис. 9.15) диаметр смоделированного круга линейно возрастает, при увеличении высоты профиля зуба H (рис. 9.16) – линейно уменьшается. Остаточная седлообразность при затыловании зуба на $2/3$ длины не влияет на контакт с деталью рабочего профиля предельно сточенного зуба после восстановления (расстояние y) (рис. 9.17, 9.18).

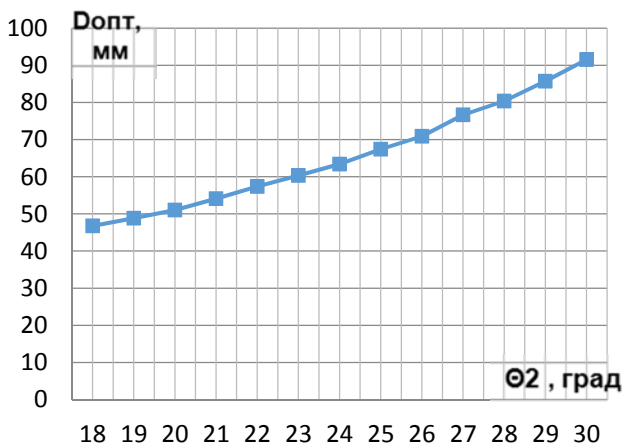


Рис. 9.15. Зависимость диаметра $D_{\text{опт}}$ смоделированного круга от угла стружечной канавки θ_2 дисковой фрезы модулем $m = 10$ мм

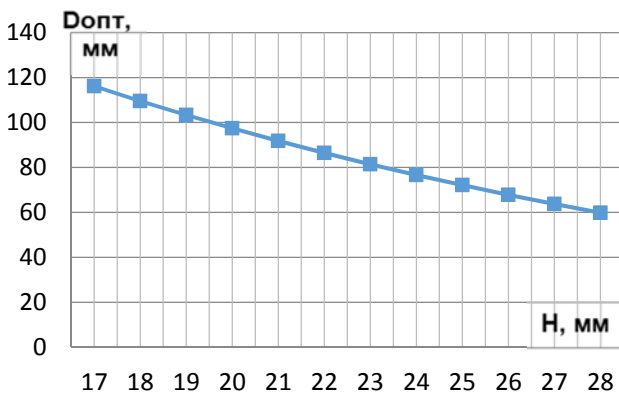


Рис. 9.16. Зависимость диаметра $D_{\text{опт}}$ смоделированного круга от высоты зуба H фрезы с $D_{\text{фр}} = 140$ мм и $z = 10$



Рис. 9.17. Расчетная схема для определения влияния седлообразности на работу максимально сточенной фрезы:

l – траектория движения точки *B* при фрезеровании; *A* – точка профиля максимально сточенного зуба; *B* – наиболее выступающая точка остаточной седлообразности; *y* – расстояние между точками *A* и *B* в процессе фрезерования

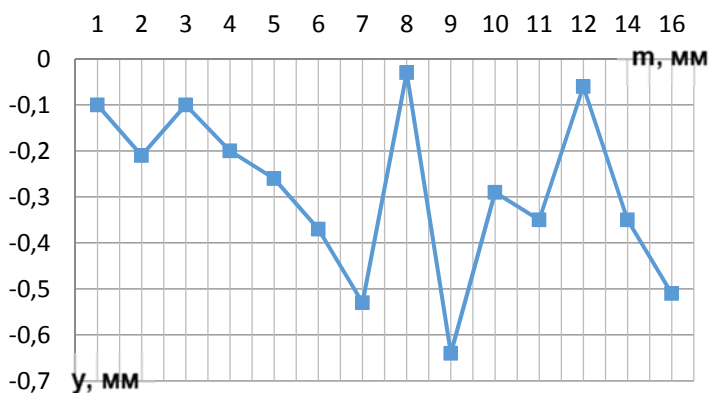


Рис. 9.18. Расстояние *y* между вершиной седла и высотой профиля максимально сточенного зуба дисковых фрез модулем *m* = 1–16 мм

Расчет допустимого количества переточек фрезы по передней поверхности при ее затыловании кругом оптимального диаметра можно осуществить на основе критерия затупления – износа чистой фрезы по задней поверхности: $h_3 = 0,2$ мм.

Исходя из формулы (3.2) толщина слоя металла, снимаемого за одну переточку:

$$h = 0,2 + (0,1 - 0,2) = (0,3 - 0,4) \text{ мм.}$$

Максимальное значение припуска на переточку, мм:

$$l_{\text{пер}} = \frac{2}{3}L, \quad (9.1)$$

где L – длина зуба фрезы, мм.

Таким образом, количество переточек зуба фрезы определяется по формуле:

$$n = \frac{l_{\text{пер}}}{h}. \quad (9.2)$$

Так для фрезы модулем $m = 2$ мм с длиной зуба $L = 11,66$ мм, максимальное значение припуска на переточку $l_{\text{пер}} = 7,77$ мм, а количество переточек зуба $n = 26$ шт.

В результате проведенного анализа моделей затылования получена зависимость количества допустимых переточек n от модуля фрезы m (рис. 9.19). Рост числа переточек с увеличением модуля фрезы предопределен увеличением длины зуба. Уменьшение числа переточек наблюдается только у фрез модулем $m = 9$ мм, что связано с уменьшением длины зуба, вызванным увеличением высоты профиля при сохранении диаметра и числа зубьев. Немонотонность кривой числа переточек вызвана отсутствием линейной связи между высотой зуба (модулем), диаметром, числом зубьев, углом стружечной канавки и, как следствие, длиной зуба фрезы. Здесь прослеживается скрытый резерв увеличения общего ресурса инструмента, реализовать который можно путем оптимизации конструкции.

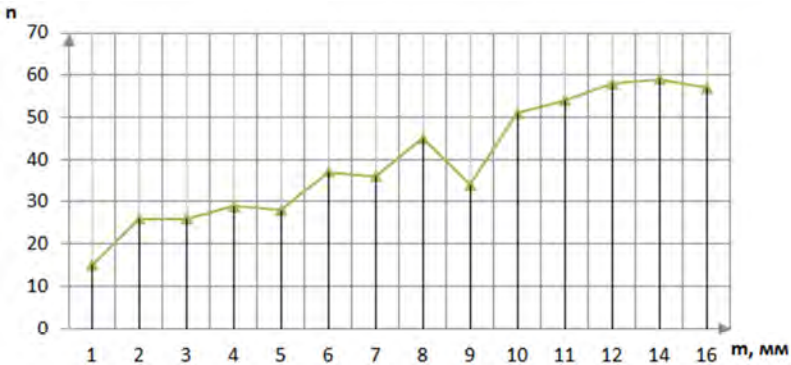


Рис. 9.19. Зависимость количества допустимых переточек n от модуля фрезы m

Выводы.

1. Применяемая функциональная зависимость (8.8) при выборе шлифовального круга для затылования стандартных дисковых модульных фрез носит приблизительный характер и не позволяет оптимизировать параметры операции затылования и тем более конструкцию фрезы.

2. Анализ результатов моделирования показывает, что на выбор диаметра круга для затылования кроме диаметра фрезы, количества зубьев и заднего угла заточки, влияет высота профиля, зависящая от модуля фрезы, и угол стружечной канавки.

3. Седлообразность, возникающая при затыловании фрез смоделированными кругами, не влияет на величину предельно сточенного зуба при восстановлении работоспособности, что исключает операцию второго затылования зуба резцом.

4. Выбор оптимального шлифовального круга должен основываться не только на ограничениях, связанных с параметрами затыловочного станка и применяемой оснастки, но и с учетом комплексного показателя операции затылования k_3 , рассчитываемого по формуле (7.1) и учитывающего ресурс как шлифовального круга, так и затачиваемого инструмента. Этот показатель позволит принимать компромиссные решения в случае неопределенности при выборе размеров шлифовальных кругов.

5. Замена опытных испытаний виртуальными по предложенному методу при решении проблем конструирования и изготовления фасонных фрез позволит снизить их стоимость и общие затраты на подготовку производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фельдштейн, Е. А. Металлорежущие инструменты : справочник конструктора / Е. А. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск : Новое знание, 2009. – 1039 с.
2. Режущий инструмент. Курсовое и дипломное проектирование : учебное пособие / под ред. Е. Э. Фельдштейна. – Минск : Дизайн ПРО, 2002. – 320 с.
3. Семенченко, И. И. Проектирование металлорежущих инструментов / И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. – М. : МАШГИЗ, 1963. – 952 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
5. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев [и др.]; под общ. ред. И. А. Ординарцева. – Л. : Машиностроение, 1987. – 846 с.
6. Родин, П. Р. Основы проектирования режущих инструментов : учебник / П. Р. Родин. – К.: Віща школа, 1990. – 424 с.
7. Родин, П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. – К. : Віща школа, 1977. – 192 с.
8. Хайруллин, А. В., Шапарев А. В. Особенности затылования режущего клина сложнопрофильного инструмента / А. В. Хайруллин, А. В. Шапарев // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 39. – С. 1166–1170.
9. Палей, М. М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М. М. Палей, Л. Г. Дибнер, М. Д. Флид. – М. : Машиностроение, 1988. – 288 с.
10. Металлорежущие станки : учебник : в 2 т. / Т. М. Аврамова [и др.]; под ред. В. В. Бушуева. – М. : Машиностроение, 2011. – Т. 1. – 608 с.
11. Станочное оборудование автоматизированного производства : в 2 т. / под ред. В. В. Бушуева. – М. : Изд-во «Станкин», 1994. – Т. 1. – 584 с.
12. Станочное оборудование автоматизированного производства : в 2 т. / под ред. В. В. Бушуева. – М. : Изд-во «Станкин», 1994. – Т. 2. – 656 с.

13. Вереина, Л. И. Конструкции и наладка токарно-затыловочных станков : учебник для сред. ПТУ / Л. И. Вереина, Б. А. Усов. – М. : Высшая школа, 1985. – 191 с.
14. Зацепина, Т. А. Станки инструментального производства : учебное пособие / Т. А. Зацепина. – М. : МГИУ, 2005.
15. Палей, М. М. Технология и автоматизация инструментального производства / М. М. Палей. – Волгоград, 1995. – 488 с.
16. Радзевич, С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / С. П. Радзевич. – К. : Растан, 2001. – 592 с.
17. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резания / В. А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995 – 264 с.
18. Панкратов, Ю. М. Профилирование обкатных инструментов / Ю. М. Панкратов. – СПб. : Изд-во «Политехника-сервис», 2010. – 158 с.
19. Алямовский, А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
20. Барсов, А. И. Технология инструментального производства / А. И. Барсов. – М. : Машиностроение, 1975. – 272 с.
21. Долгих, А. М. Технология инструментального производства : учебно-методический комплекс / А. М. Долгих. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – 216 с.
22. Королев, В. А. Справочник инструментальщика / В. А. Королев, П. М. Зотов, Л. С. Марголин. – Минск, 1976. – 415 с.
23. Космачев, И. Г. Карманный справочник технолога-инструментальщика / И. Г. Космачев. – М. : Ленинград, 1970. – 264 с.
24. Палей, М. М. Технология производства металлорежущих инструментов / М. М. Палей. – М. : Машиностроение, 1982. – 255 с.
25. Палей, М. М. Технология производства режущего инструмента / М. М. Палей. – М. : МАШГИЗ, 1963. – 483 с.
26. Режущий инструмент. Проектирование. Производство. Эксплуатация : учебное пособие / В. И. Шагун. – Минск : НПО «ПИОН», 2002. – 496 с.
27. Родин, П. П. Технология изготовления зуборезного инструмента / П. П. Родин, В. И. Климов, С. В. Якубсон. – Киев : Техника, 1982. – 208 с.

28. Технология изготовления режущего инструмента / А. И. Барсов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1979. – 136 с.

29. Юликов, М. И. Проектирование и производство режущих инструментов / М. И. Юликов, Б. И. Горбунов, Н. В. Колесов. – М. : Машиностроение, 1987. – 296 с.

30. Попов, С. А. Заточка режущего инструмента / С. А. Попов, Л. Г. Дибнер, А. С. Каменкович. – М. : Высшая школа, 1970. – 320 с.

31. Дибнер, Л. Г. Справочник молодого заточника металлорежущего инструмента / Л. Г. Дибнер. – М. : Высшая школа, 1984. – 160 с.

32. Каратырин, А. М. Заточка и доводка инструмента / А. М. Каратырин, Б. С. Коршунов. – М. : Машиностроение, 1977. – 182 с.

33. Попов, С. А. Заточка и доводка режущего инструмента / С. А. Попов. – М. : Высшая школа, 1981. – 200 с.

34. Дашевский, И. И. Профильное шлифование деталей машин и приборов / И. И. Дашевский, И. М. Бурцев, А. М. Закревский. – М. : Машиностроение, 1977. – 176 с.

35. Кремень, З. И. Специализированные абразивные инструменты / З. И. Кремень, М. А. Зайцева, С. М. Федотова. – М. : Машиностроение, 1986. – 40 с.

36. Ажар, А. В. Технология инструментального производства : пособие для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» специализации 1-36 01 03-02 «Инструментальное производство»: в 2 ч. / А. В. Ажар, А. Д. Лапука. – Минск : БНТУ, 2022. – Ч. 2. – 75 с.

37. Ажар, А. В. Оптимизация операции заточки затылованных дисковых фасонных фрез методами компьютерного 3D-моделирования // «Новые горизонты–2020». Сборник материалов VII Бело-русско-Китайского молодежного инновационного форума 17–18 ноября 2020 года. – Минск : БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 87–89.

38. Минасян, Г. О. Использование методов компьютерного 3D-моделирования для оптимизации операции затылования сложно-профильной фрезы. НИРС МСФ-2021 // Сборник материалов 77-й студенческой научно-технической конференции / сост.: О. К. Яцкевич и др. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 4–8.

39. Ажар, А. В. Проектирование и заточка зуборезных модульных фрез на основе анализа 3D-модели операции затылования // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический универ-

ситет; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.). – Минск : БНТУ, 2022. – № 34. – С. 12–22.

40. Локтев, Д. А. Рациональная эксплуатация современных червячных фрез // Стружка. – 2007. – № 16. – С. 22–34.

41. Локтев, Д. А. Современные червячные фрезы: конструкция, инструментальные материалы и износостойкие покрытия // Известия МГТУ «МАМИ», 2014. – Т. 2, № 1(19). – С. 140–152.

Учебное издание

АЖАР Александр Владимирович
ЛАПУКА Анастасия Дмитриевна

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ЗАТЫЛОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ФРЕЗ

Пособие

для обучающихся по специальности 1-36 01 03
«Технологическое оборудование машиностроительного
производства»

Редактор *П. П. Горбач*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 12.07.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,70. Уч.-изд. л. 4,35. Тираж 100. Заказ 938.

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.