

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

В.М. Ярославцев

Обработка резанием полимерных композиционных материалов

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки дипломированных
специалистов «Машиностроение»*

Москва

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

2012

УДК 621.91:620.22-419(075.8)

ББК 34.63

Я76

Рецензенты: *Ю.Ф. Назаров, М.А. Комков*

Ярославцев В.М.

Я76 Обработка резанием полимерных композиционных материалов : учеб. пособие / В.М. Ярославцев. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 180, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-3587-6

В учебном пособии представлены основы обработки резанием полимерных композиционных материалов (ПКМ). Оно содержит сведения о составе и конструктивных свойствах композиционных материалов (КМ), технологических методах получения заготовок изделий из КМ, физических основах обработки ПКМ резанием, технологиях обработки и реновации изделий из ПКМ, инновационных технологиях обработки КМ, а также справочные материалы, необходимые при выборе режимов резания. Особое внимание уделено новым и перспективным методам обработки.

Учебное пособие разработано в полном соответствии с программой дисциплины «Перспективные технологии реновации».

Для студентов машиностроительных и приборостроительных специальностей технических вузов.

УДК 621.91:620.22-419(075.8)

ББК 34.63

ПРЕДИСЛОВИЕ

Перспективы развития новой техники в настоящее время связывают с широким применением композиционных материалов (КМ), уникальность свойств которых позволяет во многих случаях значительно повысить эксплуатационные характеристики конструкций изделий, а также снизить трудоемкость и материалоемкость их изготовления, что способствует росту конкурентоспособности российских товаров на мировом рынке. Реализация конструкционных свойств, заложенных в КМ, во многом зависит от степени гарантированного обеспечения качества изделий на этапе их обработки резанием.

В учебном пособии наряду с традиционными методами обработки резанием КМ представлен ряд нетрадиционных высокоэффективных технологий, разработанных в МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана. Имеются в виду следующие технологические методы: резание с дополнительным технологическим покрытием; метод высокоскоростного резания полимерных КМ (ПКМ); метод резания с предразрушением срезаемого слоя; с заморозкой; метод широких срезов; метод резания с целенаправленным изменением напряженно-деформированного состояния в зоне резания; методы терморезания; метод термомеханической обработки ПКМ и др. В пособии содержатся практические рекомендации по выбору рациональных условий обработки КМ, представлен разнообразный по содержанию и большой по объему справочный материал (52 таблицы приложения). Даны общие подходы к решению производственных задач, связанных с повышением производительности обработки, обеспечением качества изделий, увеличением периода стойкости режущего инструмента, реновацией объектов на основе использования

новых технологических процессов, приведены примеры решения таких задач.

Материал учебного пособия во многом является обобщением результатов научно-исследовательских, теоретических, конструкторских работ, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и внедренных в промышленность по заказу предприятий аэрокосмической и оборонной техники. Представления о сущности и технологических возможностях ряда рассмотренных ниже методов обработки ПКМ как инновационных изложены в справочном издании «Машиностроение. Энциклопедия. Т. III-3: Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др. М.: Машиностроение, 2000. 840 с.».

Предлагаемое пособие направлено на улучшение технологической подготовки выпускников МГТУ им. Н.Э. Баумана разного уровня — бакалавров, магистров, специалистов по различным направлениям обучения: конструктор, технолог, испытатель, — которым в ближайшем будущем предстоит заниматься модернизацией промышленного производства на основе использования инновационных технологий, в том числе и в области обработки КМ. Новизна материала, изложенного в учебном пособии, может представлять интерес для аспирантов и работников промышленности, имеющих отношение к изготовлению изделий из КМ.

Учебное пособие «Обработка резанием полимерных композиционных материалов» предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Реновация объектов и средств материального производства». Оно может быть использовано при самостоятельной работе по изучению дисциплины «Перспективные технологии реновации», при проведении семинарских занятий, выполнении лабораторных работ, домашних заданий, курсовых и дипломных проектов, КНИРС. Пособие также может быть рекомендовано студентам, обучающимся по специальности «Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов».

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АСБ	— алмаз синтетический (бáллас)
АСПК	— алмаз синтетический поликристаллический (карбонадо)
ГКМ	— гибридный композиционный материал
ДТП	— дополнительное технологическое покрытие
КМ	— композиционный материал
МШС	— метод широких срезов
ПКМ	— полимерный композиционный материал
СОЖ	— смазочно-охлаждающая жидкость
СТМ	— сверхтвердый материал
ТВЧ	— токи высокой частоты
УУКМ	— углерод-углеродный композиционный материал
B	— ширина фрезерования, мм
D	— диаметр режущего инструмента, мм
E	— модуль упругости, Па
h	— припуск на обработку, мм
h_3	— допустимый износ по задней поверхности режущей части инструмента, мм
l	— глубина сверления
n	— частота вращения шпинделя станка, мин ⁻¹
N_3	— эффективная мощность, потребляемая при резании, кВт
P_x	— осевая составляющая силы резания, Н
P_z	— главная составляющая силы резания, Н
r	— радиус при вершине резца, мм

Ra	— среднее арифметическое отклонение профиля (параметр шероховатости поверхности), мкм
Rz	— высота неровностей профиля по 10 точкам (параметр шероховатости поверхности), мкм
S	— подача, мм/об
S_0	— подача на один оборот шпинделя, мм/об
S_z	— подача на один зуб, мм/зуб
t	— глубина резания, мм
T	— период стойкости режущего инструмента, мин
v	— скорость резания, м/с
z	— число зубьев инструмента
α	— главный задний угол, град
α_1	— вспомогательный задний угол, град
γ	— передний угол, град
ε	— относительный сдвиг
Θ	— температура, °C
λ	— угол наклона главной режущей кромки, град
ξ	— относительная линейная деформация
ρ	— плотность материала, кг/м ³
φ	— главный угол в плане, град
φ_1	— вспомогательный угол в плане, град
2φ	— двойной угол в плане, град
ω	— угол наклона винтовой канавки, град

ВВЕДЕНИЕ

Высокопрочные ПКМ за сравнительно небольшой период их освоения и применения зарекомендовали себя в качестве перспективных конструкционных материалов для изготовления ответственных изделий машиностроения. В последние десятилетия отмечен резко возросший спрос на эти материалы в ряде отраслей промышленности. В отдельных видах производства на долю деталей из КМ приходится 20...80 % общей массы конструкции. Растущая потребность в КМ и в то же время малая изученность процесса резания высокопрочных КМ определяют своевременность и актуальность обобщения и широкого применения результатов теоретических исследований и имеющихся практических наработок в области создания нетрадиционных высокоэффективных технологий обработки изделий из ПКМ.

Поиск, разработка, исследование и внедрение наукоемких технологий, как правило, были связаны с выпуском изделий оборонной промышленности. Большинство таких технологий разрабатывались под конкретный заказ, и они имели узкую объектную направленность. Однако созданные технологии и новые методы обработки ПКМ, имеющие высокие технико-экономические показатели, могут найти эффективное применение при производстве изделий различного служебного назначения.

Решение выдвинутых в настоящее время задач модернизации в различных сферах деятельности, в том числе в образовании, медицине, производстве товаров широкого потребления, напрямую связано с овладением современными знаниями

и их дальнейшим развитием, и в первую очередь — знаниями технологическими. Технология является одной из базовых наук, состояние которой во многом определяет качество жизни человека, его выживаемость как биологического объекта, а также сохранность среды обитания.

В настоящее время в учебной литературе в целом даются широкие представления о КМ и методах их первичного формообразования. В то же время при рассмотрении вопросов размерной обработки изделий из КМ специалисты ограничиваются изложением традиционных технологических процессов механической обработки резанием.

Предлагаемое учебное пособие основано на материалах лекций по разделу «Обработка изделий из композиционных материалов» дисциплины «Перспективные технологии реновации», читаемой студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана. В пособии представлены наиболее значимые нетрадиционные эффективные технологии и методы размерной обработки ПКМ, позволяющие решать комплекс технологических задач для обеспечения высоких выходных параметров изделий. Знания об инновационных технологиях могут в значительной степени способствовать как созданию высокотехнологичных разработок, так и их коммерциализации.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Композиционный материал — это искусственно созданный материал (гетерогенная система), состоящий из двух и более разнородных нерастворимых друг в друге и химически не реагирующих друг с другом компонентов (фаз), соединенных между собой поверхностными силами. Композиционные материалы сконструированы на основе принципа синергизма (взаимопомощи) и по результирующим характеристикам превосходят составляющие их компоненты. Как правило, различие в свойствах компонентов КМ четко выражено. Одним из компонентов КМ является матрица, или связующее, другим — арматура, или наполнитель. Связующее выполняет функцию дисперсной среды, в которой распределен наполнитель. Наполнитель упрочняет связующее и обеспечивает заданную жесткость.

Композиционные материалы находят применение в различных отраслях промышленности, таких, как космическая и ракетная техника, авиа-, судо-, автомобилестроение и др. В последние десятилетия наблюдается тенденция существенного расширения сфер использования КМ, а именно освоение производства новых изделий из КМ в химической промышленности, сельскохозяйственном машиностроении, станкостроении, на предприятиях медицинского, текстильного, нефтяного, газового и радиологического оборудования, спортивного инвентаря. Этому в значительной степени способствовали мероприятия по конверсии военных отраслей промышленности, а также доступность засекреченных ранее технологий изготовления изделий из КМ.

Повышенный интерес к применению КМ объясняется многообразием и уникальностью следующих их конструктивных свойств:

- высокие удельная прочность (σ/ρ) и жесткость (E/ρ);
- низкая плотность (около $(1,4...2,1) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$);
- низкая (или высокая) теплопроводность;
- высокая виброустойчивость (высокий логарифмический декремент);
- высокие электроизоляционные свойства и коррозионная стойкость и др.

Отдельные разновидности КМ могут обеспечивать высокую износостойкость изделия, малый коэффициент трения, стойкость к тепловому удару, к воздействию концентрированных источников излучения энергии (высокоэнтальпийные материалы), способны подавлять звуковые колебания, поглощать гамма-излучение и выполнять другие функции.

Основной особенностью КМ является возможность целенаправленного регулирования их свойств, что позволяет создавать конструкции или отдельные их элементы с заданными характеристиками, наиболее полно отвечающими всей совокупности условий эксплуатации, например, учитывать вид и распределение силовых нагрузок или тепловых полей, действие агрессивных сред, направленной радиации или излучений энергии и т. п.

Существенным является и тот факт, что при формообразовании изделий из КМ изготовление материала и изготовление конструкции совмещены в единый технологический процесс, т. е. спроектированная конструкция изготавливается одновременно с получением материала, имеющего заданные свойства, которые в значительной степени определяются параметрами технологического процесса.

По типу матрицы различают следующие КМ:

- с полимерной матрицей;
- с металлической матрицей;

- с углеродной матрицей;
- с керамической матрицей.

В предлагаемом учебном пособии из всех разновидностей КМ рассматриваются лишь материалы с полимерной матрицей — ПКМ, получившие в настоящее время наиболее широкое применение в промышленности.

Полимерная матрица, или связующее, как основной компонент ПКМ выполняет следующие функции:

- обеспечивает сплошность и монолитность материала;
- передает внешнее воздействие на наполнитель и перераспределяет его между отдельными волокнами;
- воспринимает сдвиговые нагрузки;
- предохраняет волокна от механических повреждений и взаимного истирания;
- предохраняет волокна от нежелательных воздействий окружающей среды.

В качестве матрицы при изготовлении изделий из ПКМ находят применение термореактивные связующие: эпоксидные, полиэфирные, кремнийорганические, фенольные и другие, лучшими среди которых являются эпоксидные связующие (например, ЭДТ-10).

Наполнитель в КМ воспринимает основные напряжения, возникающие в композиции при действии внешних нагрузок, придавая ей прочность и жесткость в направлении ориентирования волокон. Наполнитель может иметь любую природу (металлы, минералы, органика) и различную форму поверхности — непрерывные и дискретные волокна, нити, жгуты, ровинг, ленты, ткани, чешуйки, микросферы, порошки и пр. В современной технике широко используют непрерывные высокопрочные волокна, которые обеспечивают наиболее высокие механические характеристики получаемого КМ. Чаще всего это стеклянные, органические, углеродные и борные волокна, образующие в сочетании с полимерными связующими группу высокопрочных ПКМ (стекло-, органо-, угле- и боропластики).

Контрольные вопросы

1. Что такое КМ? Какие свойства КМ отличают их от других металлов и сплавов?
2. В каких областях машиностроения применяют КМ?
3. Какие конструкционные свойства КМ определяют повышенный интерес к их применению?
4. Какой физический смысл имеют понятия «удельная прочность» и «удельная жесткость»? При разработке каких изделий эти характеристики являются наиболее важными?
5. Как отличаются КМ по типу связующего?
6. Какова роль полимерного связующего в ПКМ?
7. Какие виды связующего применяют при изготовлении изделий из ПКМ?
8. Какова природа наполнителя ПКМ? Какую форму (геометрию) может иметь наполнитель?
9. Какие типы волокнистых наполнителей ПКМ наиболее широко используют в промышленности? Как называются виды ПКМ в зависимости от типа наполнителя?

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГотовок ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время разработано большое количество эффективных технологических методов первичного формообразования конструкций из ПКМ: намотка, прессование, вакуумное и автоклавное формообразование, ручная или механизированная укладка, пултрузия и другие, выбор и эффективность применения которых определяются размерами, конфигурацией и целевым назначением изделия.

Структура и свойства ПКМ существенно зависят от технологии его изготовления. Важнейшими факторами, связанными с режимами обработки и влияющими на характеристики ПКМ, являются температура, давление, режим и условия нагрева и охлаждения и др. Высокое качество изделия (однородность структуры, минимальный уровень остаточных напряжений, высокая степень завершенности процессов отверждения, кристаллизации) достигаются правильным выбором всех технологических параметров.

Рассмотрим методы первичного формообразования, применяемые для изготовления конструкций на основе волокнистых ПКМ, которые в настоящее время получили наибольшее распространение.

2.1. Формообразование намоткой

Намоткой называют технологический метод формообразования конструкций из ПКМ, при котором заготовки изде-

лий получают укладкой непрерывного армирующего наполнителя (нитей, лент, жгутов, тканей, пленок), пропитанного полимерным связующим. Наполнитель с натяжением укладывают по заданным траекториям на вращающуюся технологическую оправку. Форма и размеры оправки соответствуют внутренней конфигурации изготавливаемой детали. Формование изделия с применением технологии намотки завершается отверждением заготовки и удалением оправки. В отдельных случаях оправку сохраняют, и тогда она выполняет функцию конструктивного элемента изделия.

Формообразование методом намотки применяют для изготовления оболочек различной кривизны, сфер, труб, а также изделий типа цилиндрических и конических обечаек. Заготовку, полученную намоткой, принято рассматривать как тонкостенную силовую оболочку.

2.1.1. Виды и способы намотки

Структура материала тонкостенной силовой оболочки создается в результате последовательной укладки (намотки) ряда слоев наполнителя, которые образуют узор намотки, или, иными словами, схему армирования. В зависимости от пространственной формы витка нитей, укладываемых на поверхность оправки, различают спиральную и планарную (плоскостную) намотку.

При спиральной намотке виток нитей, уложенный на поверхность формируемой оболочки, представляет собой замкнутую или разомкнутую кривую, не лежащую в общем случае в одной плоскости. Главной разновидностью спиральной намотки является намотка по геодезическим линиям. Геодезическая линия — кратчайшее расстояние между двумя точками на поверхности формируемой оболочки. На плоскости это прямая, на цилиндре — винтовая линия, на сфере — окружность большого диаметра. При намотке по геодезическим линиям нити с поверхности оправки не со-

скальзывают, что особенно важно при намотке с большим натяжением.

При планарной намотке форма витка нитей в пространстве представляет собой плоскую замкнутую кривую (например, намотка нитей вдоль меридианов и широт оболочки).

В зависимости от состояния связующего в КМ (жидкое или вязкопластичное) различают два способа (или два режима) формообразования изделий методом намотки: «мокрая» и «сухая» намотка.

Для «мокрой» намотки характерно наличие единого технологического комплекса, состоящего из намоточного станка, шпулярника, пропиточно-натяжного тракта, системы контроля и технологической оправки. В качестве исходной заготовки для технологического процесса «мокрой» намотки применяют нити наполнителя, предварительно подсушенные горячим воздухом, которые из шпулярника комплекса для формообразования методом намотки попадают на индивидуальные натяжители, собираются в прядь и поступают в пропиточно-натяжной тракт. Пропитка пряди производится одним из следующих способов:

- протягиванием через ванночку со связующим;
- контактированием с роликом, опущенным в связующее;
- принудительной пропиткой в вакуумной камере.

После пропитки излишек связующего отжимается, прядь нитей натягивается, проходит через систему контроля и с помощью раскладывающего устройства поступает на вращающуюся оправку, установленную на намоточном станке.

«Сухая» намотка в отличие от «мокрой» имеет следующие особенности.

1. Формование изделия производят из предварительно пропитанного и подсушенного намоточного КМ — препрега. В препреге связующее находится в пластичном состоянии или частично отверждено.

2. Получение препрега выделено в самостоятельную операцию, которая осуществляется в специализированном произ-

водстве. Таким образом, изготовление намоточного КМ и его намотка на оправку разделены во времени и в пространстве.

3. Препреги получают на основе как жидких, так и твердых связующих. Твердые связующие переводятся в жидкое состояние путем расплавления или растворения в маловязких и легколетучих растворителях типа ацетона, спирта, толуола, бензола или их смесей. Растворы связующих имеют низкую вязкость, обеспечивающую равномерную, быструю и качественную пропитку нитей и тканых лент.

В настоящее время «сухая» намотка считается более прогрессивной, чем «мокрая».

2.1.2. Средства технологического оснащения

Для формообразования методом намотки используют специальные намоточные станки, выполненные на основе модернизации токарных и шлифовальных станков. Наиболее универсальными в настоящее время считаются станки с числовым программным управлением (ЧПУ) токарного типа (рис. 2.1), предназначенные для спиральной и поперечной намотки. Формование изделий намоткой на таких станках осуществляют при возвратно-поступательном движении каретки с нитераскладчиком вдоль продольной оси станка, причем скорость вращательного движения оправки ω_r и скорость перемещения нитераскладчика находятся в соотношении, при котором обеспечивается расчетное значение угла β укладки намоточного материала на всех участках траектории витка.

Для реализации указанных требований и получения заданного узора намотки необходимо осуществить следующие движения, которые обеспечиваются кинематикой станка:

- 1) вращение оправки с постоянной угловой скоростью ω_r ;
- 2) независимое возвратно-поступательное движение каретки по направляющим станины станка;
- 3) независимое возвратно-поступательное движение каретки перпендикулярно оси центров станка;

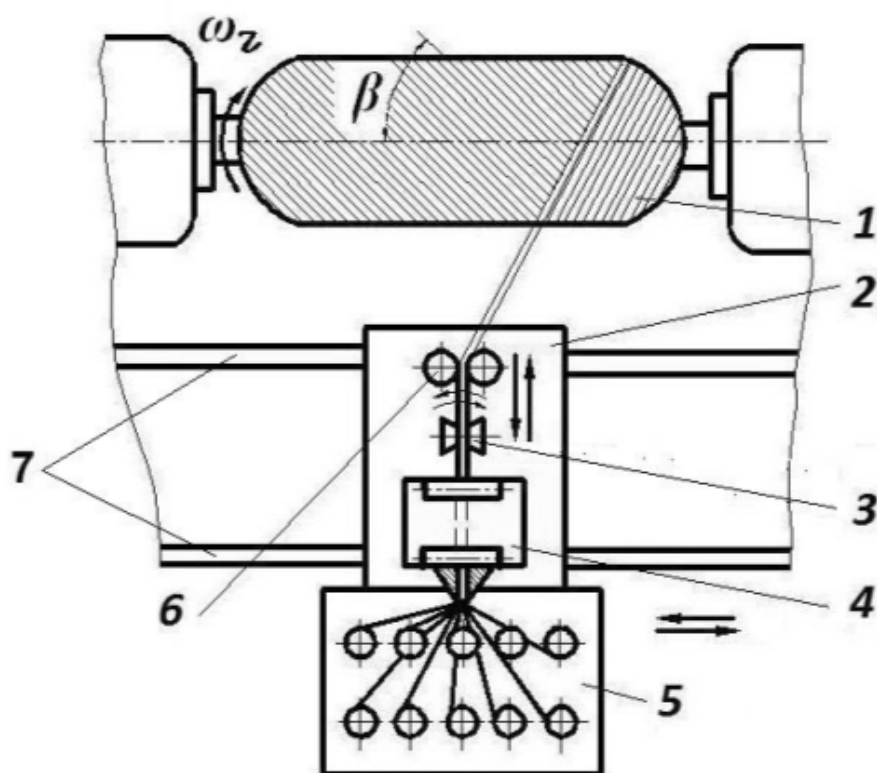


Рис. 2.1. Схема формообразования изделия спиральной намоткой на станке с ЧПУ токарного типа:

1 — технологическая оправка; 2 — намоточно-пропиточный тракт; 3 — раскладывающее устройство; 4 — пропиточная ванна или нагревательное устройство для препрегов; 5 — шпулярник; 6 — раскладывающие ролики; 7 — продольные направляющие станины станка

4) разворот раскладывающего ролика в направлении укладываемых на оправку нитей (ленты).

Результирующее движение раскладывающего ролика определяет необходимую траекторию укладки нитей относительно поверхности оправки и обеспечивает требуемый узор намотки.

Для достижения точности укладки и равномерности натяжения нитей необходимо выполнение следующих условий.

1. В течение всего процесса намотки расстояние от схода ленты с нитераскладчика до ее касания с наматываемой поверхностью должно быть постоянным.

2. Лента в месте соприкосновения с поверхностью, на которую она наматывается, должна образовывать плоскость, касательную к оболочке.

Во всех случаях изготовления изделий намоткой применяют специальную технологическую оправку. Конструкции оправок должны соответствовать следующим требованиям:

1) обеспечивать получение изделий заданных размеров и формы с требуемой точностью;

2) иметь характеристики поверхности, позволяющие выдерживать механические и температурные нагрузки;

3) иметь малую массу, низкую себестоимость изготовления, легко удаляться из готового изделия.

Технологические оправки могут быть одноразового и многоразового использования. По конструкции они подразделяются на цельные, разборные, разрушаемые и комбинированные.

Цельные оправки применяют в серийном производстве при формировании тех изделий, из которых оправку можно извлечь полностью (цилиндры, конусы, полусферы и т. п.). В этих случаях при извлечении оправки из изделия не возникает принципиальных трудностей, если на ее поверхность предварительно нанесено антиадгезионное покрытие. Для обеспечения демонтажа поверхность цилиндрических оправок выполняют с небольшим технологическим конусом (1 : 100 ... 1 : 200).

Разборные оправки извлекают по частям. Их используют при формировании изделий, из которых цельные оправки извлечь не представляется возможным (например, цилиндрические оболочки с днищами, сферические оболочки с большими полюсными отверстиями). Разновидностью разборных оправок являются надувные оправки из резины.

К достоинствам разборных оправок можно отнести: возможность многоразового использования, жесткость, сравнительно легкое извлечение из готового изделия, обеспечение точности намотки. Однако конструкция их сложна, процесс

изготовления дорог и трудоемок по сравнению с изготовлением оправок других типов.

Разрушаемые оправки применяют в тех случаях, когда контур изделия является замкнутым или близким к такому (например, оболочки с малыми полюсными отверстиями, имеющие форму сферы, овала, тора). Для изготовления этих оправок используют гипс, эвтектические соли, легкоплавкие металлы, песок, связанный раствором поливинилового спирта в воде, парафиновосковую смесь. Разрушаемые оправки получают методами литья или прессования в специальных пресс-формах, поверхность которых покрывают кремнийорганической или графитовой смазкой. Из готового изделия оправки удаляют вымыванием, выплавлением, механическим разрушением, растворением в соответствующих жидкостях при нормальной или повышенной температуре.

Комбинированные оправки совмещают в себе конструктивные элементы как одноразового, так и многоразового использования.

2.1.3. Технологическое обеспечение качества изделий из композиционных материалов

Качество и надежность конструкций из КМ, изготовленных намоткой, в значительной степени зависят от технологических составляющих процессов намотки и отверждения. При этом основными технологическими факторами, которые подлежат контролю и регулированию, являются: 1) натяжение армирующего наполнителя; 2) вязкость и температура связующего; 3) температура разогрева ленты и количество связующего в ленте; 4) точность укладки наполнителя на оправку; 5) скорость намотки; 6) параметры отверждения.

К недостаткам, вызывающим ухудшение качества конструкций, полученных намоткой, следует отнести неравномерность распределения связующего по толщине стенки и

определенные трудности при съеме оболочки с оправки (особенно если длина оправки превышает 2 м).

2.2. Формообразование прессованием в формах

Прессование, так же как и намотка, относится к одному из наиболее распространенных методов формообразования изделий из ПКМ. Сущность его состоит в том, что прессуемый материал (наполнитель и связующее вещество), заполняя полость пресс-формы, принимает и сохраняет ее конфигурацию, которая соответствует форме и размерам изготавливаемого изделия. Фиксация геометрии изделия происходит в результате отверждения реактопластов или охлаждения термопластов непосредственно в форме под действием механической и тепловой энергий.

При изготовлении деталей прессованием наполнителем (арматурой) служат материалы с хаотическим или ориентированным расположением волокон. В случае хаотического расположения волокон исходными материалами при прессовании могут выступать короткие (рубленые) волокна, обрезки лент, гранулы из пучков волокон, предварительно пропитанные связующим и соединенные путем его частичного отверждения в таблетки.

Для получения слоистой структуры с ориентированным расположением волокон используют заготовки из препрегов (лент или тканей). В этом случае предварительно раскроенные заготовки укладывают в определенном порядке в пакет (иногда сшивают) и слегка спрессовывают.

2.2.1. Технологические особенности формообразования прессованием

Прессование давлением $P_{\text{пр}}$ осуществляют в предварительно нагретой пресс-форме, состоящей из двух основных частей: матрицы и пуансона (рис. 2.2). Пуансон входит с зазором

в матрицу, заполненную прессуемым материалом. Размер зазора зависит от толщины стенки изготавливаемой конструкции и усадки прессуемого материала при его уплотнении. При смыкании полуформ создают необходимое давление на исходную заготовку (прессуемый материал) и она принимает конфигурацию и размеры внутренней полости пресс-формы. После смыкания полуформ прессуемый материал выдерживают в течение необходимого времени при температуре отверждения связующего, после чего готовое изделие удаляют.

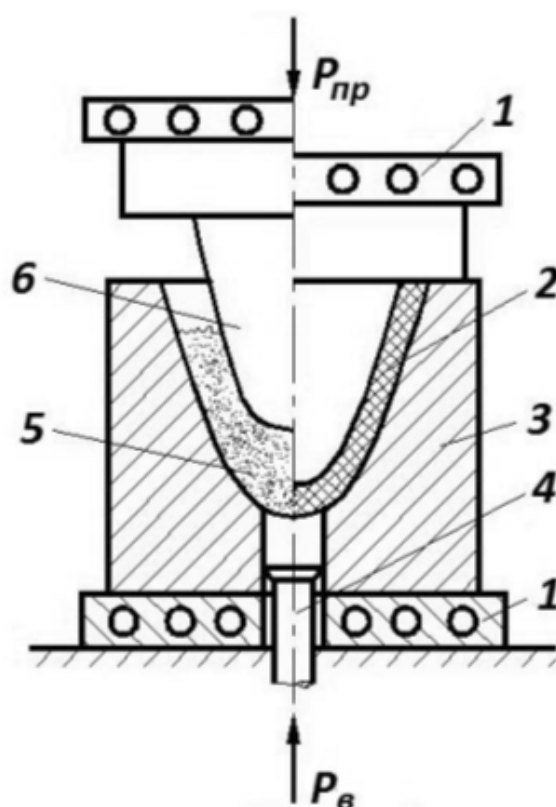


Рис. 2.2. Схема формообразования прессованием:

1 — плиты обогрева; 2 — изделие на конечной стадии прессования; 3 — матрица; 4 — выталкиватель; 5 — заготовка (прессуемый материал); 6 — пуансон

Нагрев пресс-формы производят с помощью электронагревателей, расположенных в плитах обогрева матрицы и пуансона (см. рис. 2.2), или другими способами, например воздействием токов высокой частоты (ТВЧ). Температуру

прессования обычно принимают равной 105...150 °С, причем для крупных конструкций задают более низкие значения.

Давление прессования создают с помощью гидравлического пресса, на столе которого, как правило, устанавливают матрицу, а на подвижной плите — пуансон пресс-формы. Давление составляет примерно 1,4 МПа, однако максимальное значение может достигать 3,5 МПа.

Изделия из пресс-формы обычно извлекают сжатым воздухом, подаваемым через выталкиватель под давлением P_v (см. рис. 2.2), вакуумным чашечным присосом и др. Для того чтобы предотвратить коробление крупногабаритных деталей в процессе охлаждения, после извлечения их помещают в специальные оправки. Оправки могут быть снабжены приспособлениями для пробивки или сверления отверстий, фасонного фрезерования и выполнения других операций механической обработки. При малых партиях деталей их охлаждение до температуры 40...60 °С производят в матрице.

2.2.2. Технологическое обеспечение качества прессованных изделий

Прессование является высокопроизводительным методом формообразования, обеспечивающим стабильную и высокую точность воспроизведения формы и размеров изделия. При этом качество обработки мало зависит от квалификации рабочих и достигается при минимальных затратах труда. Применение метода прессования наиболее эффективно в условиях серийного производства. Однако при изготовлении ответственных конструкций с высокими требованиями к точности формы и размеров, эксплуатационным характеристикам прибегают к использованию прессования в условиях опытного и единичного производства, например при получении изделий ракетной техники. Прессованием изготавливают конструкции раструбов (насадок) сопел, обтекатели для самолетов, решетки стабилизаторов глубинных бомб и др.

Основными технологическими параметрами процесса прессования, определяющими показатели качества изготовленной конструкции, являются: начальная температура ПКМ и пресс-формы; давление прессования и скорость его приложения; время выдержки прессуемого материала в пресс-форме; температура извлечения готового изделия из пресс-формы. При использовании реактопластов решающее влияние на выбор режима прессования оказывает скорость их отверждения, а при прессовании термопластов — скорость их охлаждения непосредственно в форме.

Неправильный выбор режима прессования, некачественная подготовка материала могут вызывать появление в изделии при его формообразовании таких дефектов, как пузырьки воздуха вокруг выступающих участков на поверхности детали, участки с недостаточным содержанием связующего вследствие избытка наполнителя, растрескивание связующего, а также участков с его избыточным содержанием.

Для исключения адгезии с технологической оснасткой и облегчения извлечения готового изделия из пресс-формы во все КМ вводят антиадгезионные вещества (внутренние антиадгезионные смазки) — стеараты (пылевидные порошки Zn, Ca и Al, стеариновую кислоту).

2.3. Методы формообразования с использованием эластичной диафрагмы

При формообразовании изделий с помощью эластичной диафрагмы конструкция приобретает необходимую конфигурацию, а КМ — требуемые свойства благодаря обжатию исходной заготовки в процессе ее отверждения давлением, которое создается разностью его значений с внутренней и внешней сторон диафрагмы.

Диафрагма — это тонкая эластичная мембрана (например, полиамидная пленка) или форма (эластичный мешок), выполненная из силиконового (специального армированно-

го) каучука, прорезиненной ткани или другого материала, выдерживающего температуру до 200 °С.

2.3.1. Технологические особенности формообразования с использованием эластичной диафрагмы

Заготовкой для технологического процесса формообразования изделий с помощью эластичной диафрагмы служит препрег. Препрег выкладывают на имеющие плоскую или криволинейную форму технологические оправки. Заготовка под воздействием давления, приложенного через эластичную диафрагму извне по всей формируемой поверхности, проходит процесс отверждения и уплотнения. Уплотнение происходит в результате устранения пустот и удаления избытка смолы. Чтобы гарантировать качество изделия, необходимо избегать образования пузырей в КМ, а также строго контролировать значения давления, температуры и массовое соотношение между волокнами и смолой. Для обеспечения герметичности конструкции из ПКМ в технологической оснастке предусматривают вентиляционные отверстия, связанные с атмосферой или вакуумом и предназначенные для вывода летучих побочных продуктов химической реакции отверждения и воздуха из формируемого пластика.

Стоимость оснастки при формообразовании с использованием эластичной диафрагмы ниже, чем при прессовании (отсутствует вторая часть формы — пуансон или матрица, которая заменена диафрагмой).

2.3.2. Разновидности методов формообразования с использованием эластичной диафрагмы

К методам формообразования с помощью эластичной диафрагмы относят:

- вакуумное формование;
- формование под давлением (метод пресс-камеры);

- автоклавное формование.

Рассмотрим их особенности.

Отличительной особенностью вакуумного формования является то, что процесс изготовления изделия происходит под действием атмосферного давления (до 0,1 МПа) в вакуумном чехле (рис. 2.3) после откачки из него воздуха.

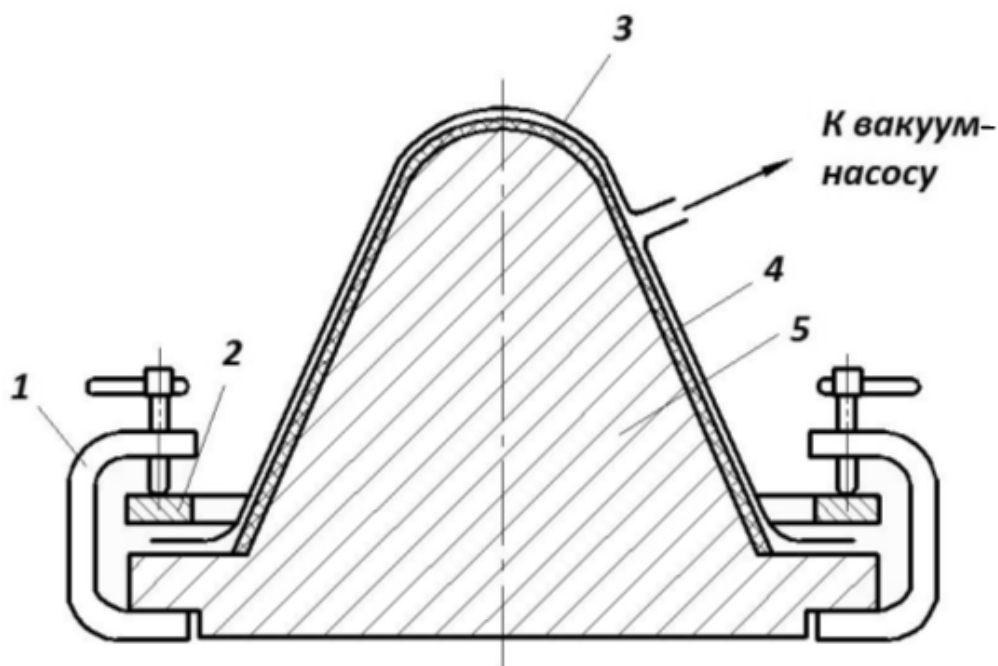


Рис. 2.3. Схема вакуумного формования с использованием эластичной диафрагмы:

1 — винтовой прижим; 2 — прижимное кольцо; 3 — эластичная диафрагма; 4 — заготовка; 5 — форма (технологическая оправка)

При формовании под давлением (рис. 2.4) исходный материал во время отверждения принимает требуемые форму и размеры вследствие обжатия сжатым воздухом, паром, жидкостью (давление до 40 МПа) или горячими газами (давление до 2 МПа).

При автоклавном формовании реализуют схемы методов вакуумного формования и формования под давлением. Заготовку, герметично упакованную в резиновый чехол, помещают в автоклав. Отверждение заготовки происходит в печи или непосредственно в автоклаве. Температура и продолжи-

тельность процесса отверждения определяются типом связующего и геометрией детали. При формировании в автоклаве и под давлением температура обычно составляет 177 °С, а давление газа — примерно 1,4 МПа.

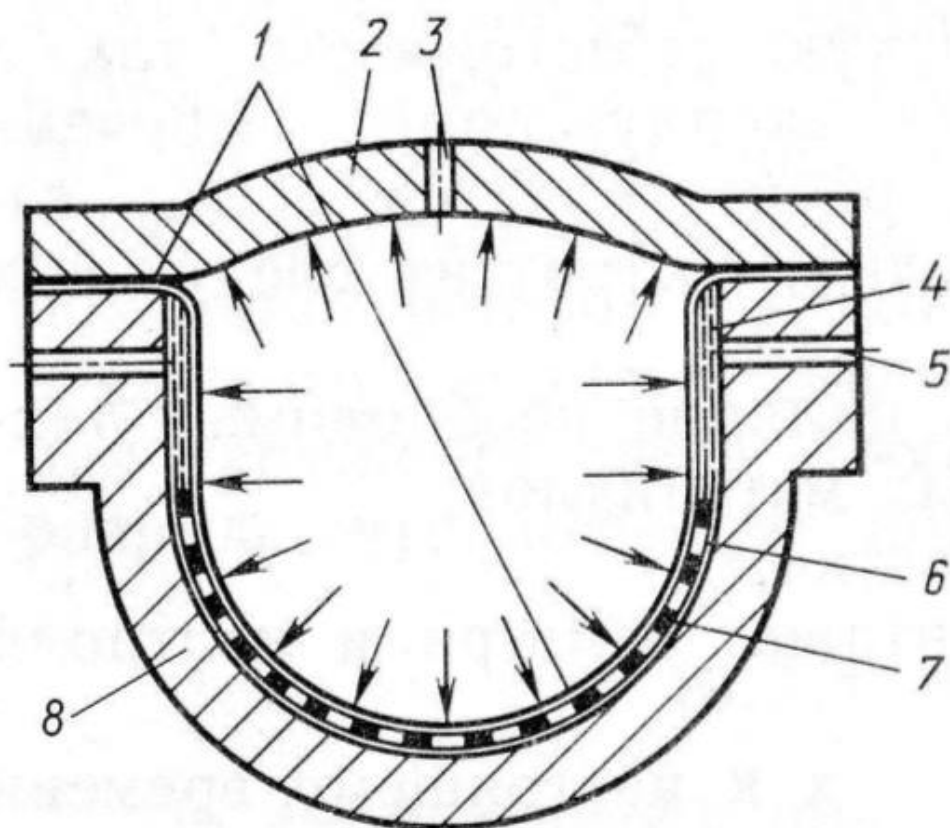


Рис. 2.4. Схема формования с эластичной диафрагмой под давлением:

1 — эластичная диафрагма; 2 — крышка формы; 3 — канал для подачи сжатого газа или жидкости; 4 — боковое выпускное отверстие; 5 — канал для соединения с атмосферой или вакуумом; 6 — заготовка (формуемый материал); 7 — вертикальное выпускное отверстие; 8 — форма (матрица)

Охлаждение детали совместно со всей оснасткой происходит под давлением. После охлаждения до температуры 68 °С (учитываются требования пожаробезопасности) давление снижают, открывают автоклав или форму и извлекают деталь, после чего она при необходимости проходит дальнейшую обработку.

Методы формообразования с использованием эластичной диафрагмы предназначены для получения конструкций сложной формы. Этими методами изготавливают:

- обтекатели гидролокаторов (сонары);
- обтекатели и кожухи антенн радиолокаторов (в авиации);
- обтекатели самолетов;
- сложные конструкции в судостроении (в США, Японии и др.).

2.4. Формообразование методом пултрузии

Пултрузия — метод непрерывного протягивания армирующего материала, пропитанного связующим и отвержденного в профилирующей форме специальной установки.

Пултрузией из одноосно-ориентированных волокнистых пластиков изготавливают различные профильные изделия с постоянным поперечным сечением (прутки, трубы со сложным градиентом свойств и др. — рис. 2.5).

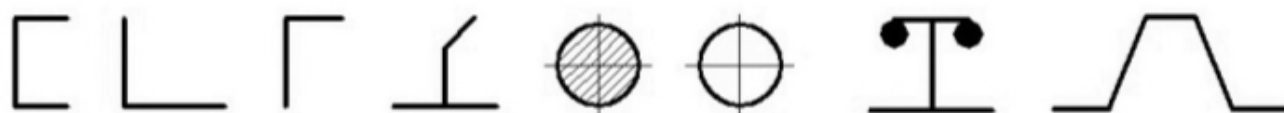


Рис. 2.5. Примеры профилей изделий, изготавливаемых методом пултрузии

На рис. 2.6 представлена принципиальная схема процесса получения конструктивных элементов методом пултрузии.

Армирующий материал 1 (жгуты, холсты или тканые ленты) последовательно проходит через ванну с жидким связующим 2, пропитывается, сжимается и далее поступает в матрицу предварительного формования 4, затем в обогреваемую пресс-форму 5, где фиксируется требуемая конфигурация и отверждается полимерное связующее. В матрице предварительного формования плоская по форме лента материала постепенно преобразуется и ее сечение

приближается к форме получаемого конструктивного элемента. Окончательно сечение формируется в обогреваемой пресс-форме, где в результате нагрева происходит частичное отверждение. Два формующих устройства (матрицу и пресс-форму), расположенные после ванны со связующим, используют для улучшения пропитки и смачивания жгута. Завершают отверждение после формования изделия термообработкой в печи 6.

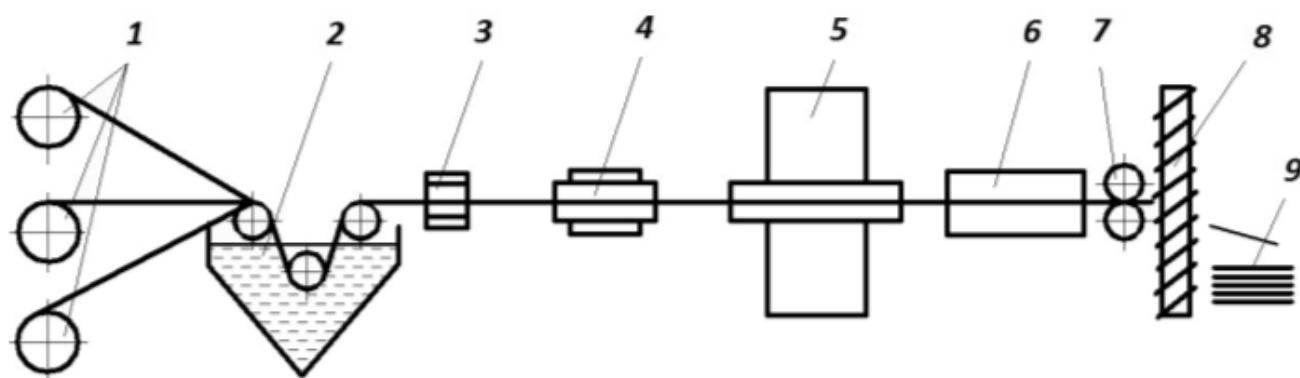


Рис. 2.6. Принципиальная схема процесса формообразования методом пултрузии:

1 — армирующий материал; 2 — ванна со связующим; 3 — направляющие ролики; 4 — матрица предварительного формования; 5 — обогреваемая пресс-форма; 6 — печь для термообработки; 7 — тянущее устройство; 8 — устройство для разрезания профиля; 9 — накопитель для заготовок

Материал протягивают по всему тракту формообразования с помощью тянущего устройства 7, например фрикционной роликовой передачи или какого-либо другого устройства. Полученный профиль, трубу или прутки разрезают на части определенной длины. Разрезание осуществляют дисковыми пилами с режущими элементами, выполненными из твердого сплава или искусственных алмазов. В некоторых установках используют гидрорезание — резание тонкой сверхзвуковой струей жидкости, истекающей под высоким давлением из специального сопла. На этапе отрезания заготовки режущее устройство должно перемещаться вместе с ее движением при непрерывности процесса пултрузии.

Полученные конструктивные элементы используют при сборке изделий.

Достоинствами формообразования методом пултрузии являются:

- возможность изготовления изделий любой длины;
- высокая точность получаемых изделий;
- надежное обеспечение заданного соотношения наполнителя и связующего;
- высокий коэффициент использования материала (до 95 %);
- высокая скорость (производительность) процесса (до 4...6 м/мин).

При формовании различных профилей из непрерывных нитей или жгутов получают изделия с максимальными значениями прочности при изгибе и растяжении вдоль оси протягивания.

Новыми областями применения формообразования методом пултрузии являются:

- укладка подводных труб с борта корабля;
- получение больших рамных конструкций в космосе с помощью устройств, смонтированных на космических летательных аппаратах.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит главная особенность изготовления конструкций из КМ?
2. Какие режимные параметры являются наиболее важными для обеспечения высокого качества при изготовлении изделий из ПКМ?
3. В чем заключается сущность формообразования изделий методом намотки?
4. Для формообразования каких изделий применяют метод намотки?
5. Какие основные схемы армирования используют при намотке?

6. В чем заключается особенность намотки по геодезическим линиям?
7. В чем различие «мокрой» и «сухой» намотки?
8. Какими движениями обеспечивается формообразование изделий на намоточных станках токарного типа?
9. Каким требованиям должна удовлетворять технологическая оправка?
10. Какие виды конструкций технологических оправок используют для намотки?
11. От каких технологических факторов зависят качество и надежность конструкций из КМ?
12. В чем выражаются основные недостатки метода намотки?
13. В чем заключается сущность формообразования изделий прессованием в пресс-формах?
14. Из каких исходных материалов изготавливают изделия прессованием?
15. Какие требования к изделию вызывают необходимость применения прессования?
16. Какие изделия изготавливают прессованием?
17. Как осуществляют отверждение полимерного связующего при прессовании?
18. Какие дефекты характерны для конструкций изделий при неправильном выборе режима прессования?
19. В чем заключается сущность формообразования с использованием эластичной диафрагмы?
20. Какие методы относят к методам формообразования с использованием эластичной диафрагмы?
21. Что представляет собой эластичная диафрагма?
22. Для чего предназначены вентиляционные отверстия в технологической оснастке для формообразования?
23. Какие детали изготавливают методами формообразования с использованием эластичной диафрагмы?
24. В чем заключается сущность формообразования методом пултрузии?

25. Какие изделия изготавливают методом пултрузии?

26. Какие технологические операции включает процесс пултрузии?

27. В чем состоят основные достоинства изготовления изделий методом пултрузии?

3. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В технологическом процессе изготовления деталей из ПКМ конечной операцией, как правило, служит механическая обработка резанием, что обусловлено следующими причинами.

1. Обработка резанием может явиться единственным средством, позволяющим обеспечить необходимое качество ответственных деталей современных машин, достигнуть заданных требований к показателям точности изготовления и параметрам шероховатости поверхности деталей, от которых зависят надежность, работоспособность, ремонтпригодность и другие эксплуатационные свойства конструкции в целом.

2. Поверхности сложной формы экономически более целесообразно получать, вводя в технологический процесс изготовления изделий из ПКМ дополнительную механическую обработку резанием (вторичное формообразование), нежели усложнять процесс первичного формообразования, используя при этом дорогостоящий формующий инструмент для приближения формы заготовки к заданной форме готовой детали.

3. Механической обработкой резанием обеспечивается удаление литников, заусенцев, грата, остающихся на изделиях после завершения процесса первичного формообразования. В отдельных случаях трудоемкость таких операций достигает 60 % общей трудоемкости изготовления деталей из ПКМ.

4. Некоторые детали из слоистых ПКМ могут быть получены только механической обработкой резанием, так как заготовки поставляются в виде листов, плит, труб или профилей.

5. Обработка резанием становится целесообразной при малом объеме выпускаемой продукции, когда изготовление специальной технологической оснастки (например, пресс-формы или оправки) экономически неоправданно.

3.1. Особенности свойств полимерных композиционных материалов и их влияние на процесс резания

Полимерные КМ отличаются большим разнообразием химического состава, структуры, физико-химических, конструктивных и технологических свойств. Вместе с тем можно выделить ряд общих особенностей строения и свойств ПКМ самого различного вида и назначения, которые оказывают непосредственное влияние на протекание процесса резания и его технологические показатели. Это неоднородность строения и структурная анизотропия, низкая теплопроводность, высокое абразивное воздействие наполнителей, высокие упругие характеристики и реологические свойства, а также ряд других.

Рассмотрим связь физических и химических свойств КМ с особенностями процесса резания и его технологическими показателями.

1. Неоднородность строения и структурная анизотропия КМ отражаются на всех основных выходных параметрах процесса резания. Так, разнородность свойств связующего и волокнистого наполнителя затрудняет получение малой шероховатости поверхности, может вызвать волнистость поверхности или ее огранку, кратную регулярности расположения перерезаемых волокон, с отклонением от круглости до 1...2 мм (для углерод-углеродных композиционных материалов — УУКМ). Вследствие неоднородности или в ряде случаев слоистости структуры и относительно слабой адгезии связующего с армирующими волокнами механическая обработка может сопровождаться образованием трещин и расслоений, локальных дефектов, выкрашиваний связующего и сколов ма-

териала (особенно в местах входа и выхода инструмента), ворсистости и разлохмачивания перерезанных волокон. Это вызывает существенные трудности в обеспечении высокого качества поверхностного слоя. Структурная анизотропия ПКМ приводит к анизотропии технологических параметров резания: силовых факторов, шероховатости поверхности, глубины дефектного слоя обработанной поверхности, интенсивности изнашивания режущего инструмента и др.

Например, при обработке однонаправленных ПКМ колебание значений составляющих силы резания может достигать двух-трех раз, изменение глубины дефектного слоя (микро- и макротрещин) — трех и более раз, изнашивания инструмента 1,5–1,8 раз в зависимости от направления перемещения инструмента относительно перерезаемых армирующих волокон. Для органопластиков в широких пределах изменяются параметры ворсистости поверхности (коэффициент ворсистости K_v и др.).

2. Низкая теплопроводность (до 500–600 раз ниже, чем теплопроводность сталей) вызывает в тонких поверхностных слоях материала в зоне обработки резанием концентрацию теплоты резания. Это явление в сочетании с низкой теплоустойчивостью ПКМ (180...350 °С) может приводить к образованию недопустимого дефекта обработанной поверхности — термомеханической деструкции поверхностного слоя детали (рис. 3.1), выражающейся в разрыве химических связей молекулярных цепей полимера, появлении прижогов, образовании коксового слоя связующего. Возникающая одновременно с этим термодеструкция активно влияет на изнашивание инструмента, что в целом ограничивает интенсивность режимов резания, обуславливает особые требования к конструктивному исполнению и выбору материалов режущих инструментов, обеспечивающих в этом случае отвод основной доли теплоты (до 90 % и более) из зоны резания.

3. Сильное абразивное воздействие наполнителей ПКМ (стеклянных, угольных, борных волокон) в связи с их высо-

кой твердостью обуславливает интенсивное изнашивание инструмента при резании, ограничивает в отдельных случаях применение для обработки наиболее широко распространенных групп инструментальных материалов — быстрорежущих сталей и твердых сплавов. Например, у ПКМ на основе волокон бора микротвердость наполнителя составляет 40...43 ГПа, что соизмеримо с микротвердостью натуральных алмазов (98,1 ГПа), синтетических алмазов (89 ГПа) и эльбора-Р (84 ГПа), в то время как для эффективного осуществления процесса резания твердость лезвия должна в 4–6 раз превосходить твердость обрабатываемого материала. Для обработки боропластиков могут быть применены только сверхтвердые материалы (СТМ), но и в этом случае трудностей обработки не избежать: период стойкости инструмента составляет 8...10 мин; геометрия режущего лезвия подвергается существенным изменениям, оказывая значительное влияние на качество поверхности, точность размеров и формы детали.

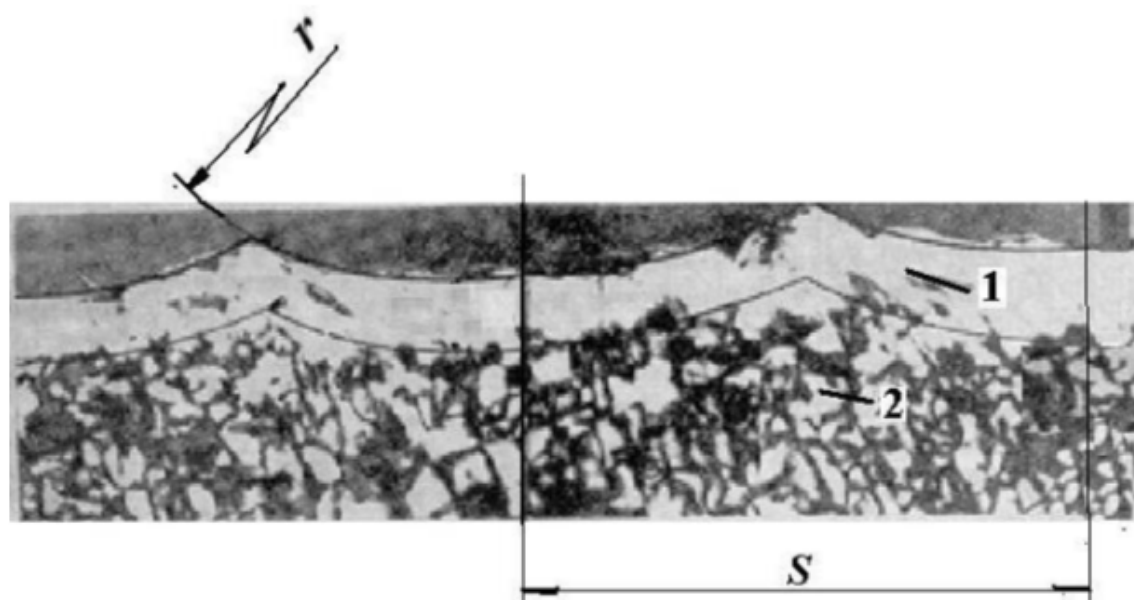


Рис. 3.1. Структура поверхностного слоя материала после обработки резанием:

1 — поверхностная зона, претерпевшая термомеханическую деформацию; 2 — основная структура; r — радиус при вершине резца; S — подача

4. Высокие упругие характеристики ПКМ приводят к упругому восстановлению поверхностного слоя материала после воздействия инструмента, что увеличивает площадь контакта и контактные нагрузки на заднюю поверхность режущих элементов и, как следствие, приводит к повышенной интенсивности изнашивания последних. Кроме того, упругое восстановление обработанных поверхностей необходимо учитывать в случае изготовления высокоточных деталей. Например, при сверлении органопластиков уменьшение диаметра (усадка) отверстий может составлять 0,10...0,15 мм на 10 мм диаметра сверла.

5. Реологические свойства ПКМ (ползучесть и релаксация остаточных напряжений) приводят к изменению с течением времени формы и взаимного расположения обработанных поверхностей, что может вызвать дополнительные трудности обеспечения точности изделий, особенно при обработке крупногабаритных корпусных изделий. Реология материала может проявляться и в результатах измерения параметров шероховатости. В качестве примера на рис. 3.2 показана зависимость параметра шероховатости R_z от времени его измерения после окончания обработки детали из стеклопластика.

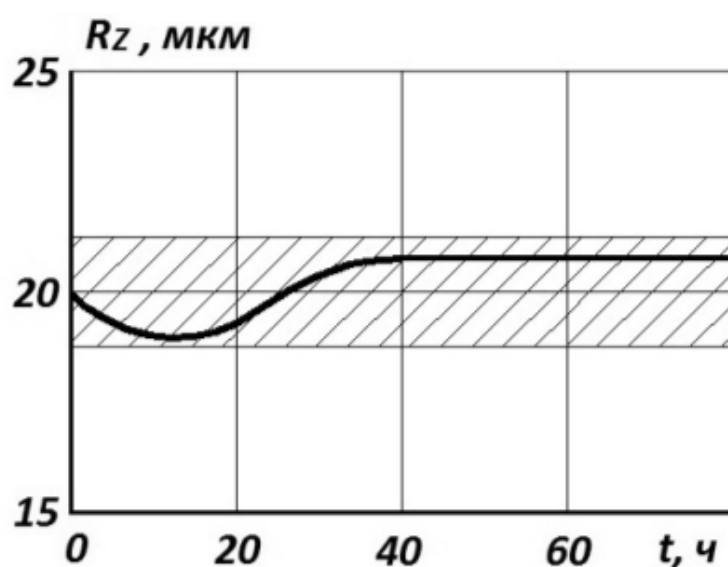


Рис. 3.2. Зависимость параметра шероховатости R_z от времени его измерения после окончания обработки

6. Одним из специфических свойств ПКМ является их гигроскопичность. Водопоглощение происходит в результате заполнения водой структурных дефектов материала, к числу которых относятся микропоры, капилляры, трещины (непроемы, расслоения) и др. В итоге происходит снижение прочности ПКМ — растрескивание связующего в местах концентрации напряжений, понижение механических свойств волокна. Кроме того, водопоглощение может приводить к изменению размеров и формы изделий, снижению их диэлектрических характеристик и др. Это затрудняет применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) при резании ПКМ, вызывает необходимость применения дополнительной операции — сушки изделия после обработки. Поэтому в большинстве случаев механическую обработку ПКМ, несмотря на их низкую теплостойкость и теплопроводность, следует производить без охлаждения СОЖ или применять для охлаждения сжатый воздух.

7. Значения составляющих силы резания при обработке ПКМ существенно меньше, чем при резании металлов. Например, главная составляющая P_z силы резания при точении стекло-, угле- и органопластиков в зависимости от условий обработки в 14–60 раз меньше составляющей P_z силы, действующей на эквивалентных режимах при точении коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов. Вследствие этого действие силовых факторов при резании ПКМ, как правило, не оказывает значительного влияния на деформацию конструктивных элементов технологического оборудования и оснастки. Вместе с тем деформации самих изделий из ПКМ с относительно невысокими значениями модуля упругости, особенно при изготовлении крупногабаритных или тонкостенных оболочковых конструкций, могут вызывать значительные трудности в обеспечении заданных требований к точности обработки.

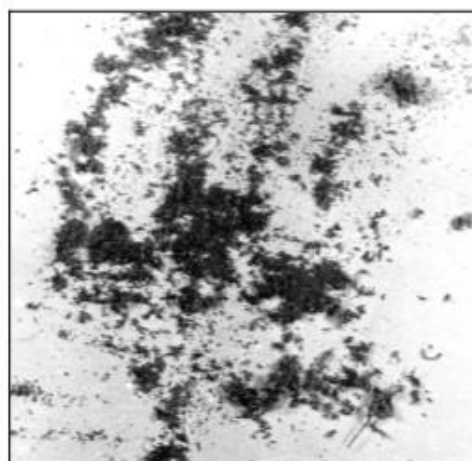
К положительным свойствам ПКМ относится их высокая виброустойчивость, позволяющая при проектировании тех-

нологических операций механической обработки назначить повышенные значения глубины резания и подачи.

8. Образующаяся при лезвийной обработке ПКМ стружка сходит, как правило, в виде непрерывной ленты, состоящей из большого количества отдельных фрагментов материала, связанных между собой обрывками волокон наполнителя и частицами разрушенного связующего (рис. 3.3, *а*). Процессу отделения стружки сопутствует образование мелкодисперсной пыли (частиц наполнителя со связующим — рис. 3.3, *б*) при выделении токсичных, химически и биологически активных газообразных веществ — продуктов разложения связующего.



а



б

Рис. 3.3. Типичный вид стружки, образующейся при лезвийной обработке ПКМ (*а*) и возникающие в процессе стружкообразования мелкие фрагменты КМ и пыль (*б*)

В этих условиях для защиты обслуживающего персонала и оборудования от воздействия вредных факторов требуется соблюдение техники безопасности и правил производственной санитарии, а именно оснащение металлорежущих станков пылеотсасывающими устройствами большой мощности, а производственных помещений — приточно-вытяжной вентиляцией.

Таким образом, особенности свойств ПКМ показывают, что для обработки резанием эти материалы представляют

значительные трудности, решение которых может быть достигнуто за счет совокупности мероприятий, направленных на улучшение их обрабатываемости резанием.

3.2. Обрабатываемость резанием полимерных композиционных материалов

3.2.1. Понятие обрабатываемости резанием

Обрабатываемость резанием — технологическое свойство, которое характеризует способность материала поддаваться обработке резанием. Понятие «поддаваться обработке резанием» означает сумму взаимосвязанных свойств материала, обеспечивающих удаление припуска и целенаправленное формирование требуемых технологических показателей обработки. Физический смысл это понятия состоит:

1) в свойстве обрабатываемого материала претерпевать деформации и разрушение при механическом взаимодействии инструмента и заготовки. Это свойство противоположно свойству материала оказывать сопротивление разрушению при резании в условиях высокоскоростного динамического нагружения и интенсивного сжатия;

2) в способности материала в условиях воздействия всей совокупности трудноуправляемых и малоизученных физико-химических процессов и явлений, вызванных динамическим разрушением, восстанавливать (реновировать) атомарные связи и образовывать новые устойчивые структуры, обеспечивающие служебные свойства обработанных поверхностей.

Физическая составляющая обрабатываемости резанием обеспечивает конечный результат технологического процесса, является для одного и того же материала величиной переменной, зависящей от условий обработки.

Обрабатываемость резанием как одно из важнейших технологических свойств материала определяет возможность применения тех или иных методов, способов, видов обработ-

ки резанием, формирования поверхностного слоя с новыми свойствами, отвечающими требованиям решаемой технологической задачи, оказывает значительное влияние на стоимость продукции, продолжительность освоения ее выпуска, объемы капитальных вложений и темпы производства. Обрабатываемость резанием входит в состав оцениваемых и учитываемых технологических свойств материала.

Обрабатываемость резанием, так же как и другие технологические свойства, зависит от химического состава, способа получения материала, вида термической обработки, от условий предшествующей и текущей обработки. Обрабатываемость резанием конкретного материала на конкретной операции определяется также совокупностью технологических и экономических требований к изготовлению детали.

Обрабатываемость резанием в настоящее время не имеет единственного выражения и проявляется через сумму показателей и параметров. Это объясняется кругом задач, решаемых с помощью обработки резанием. Можно выделить основные показатели и параметры, наиболее часто используемые на практике:

- технико-экономические показатели — производительность, себестоимость, период стойкости режущего инструмента, скорость резания, способность к стружкодроблению;
- показатели качества обработки — точность обработки и качество поверхностного слоя (шероховатость, твердость, глубина наклепанного слоя и степень наклепа, величина, знак и глубина залегания остаточных напряжений и др.);
- параметры, характеризующие напряженность процесса резания, — сила и температура резания, коэффициент укорочения стружки, износ режущего инструмента.

Таким образом, материалом с хорошей обрабатываемостью является такой, который позволяет получить сравнительно высокую производительность обработки при допустимой (нормальной) стойкости режущего инструмента (материал легко поддается разрушению) и одновременно,

восстанавливая разрушенные атомарные связи, обеспечивает необходимые физико-механические свойства обработанной поверхности, достаточно высокую точность размеров деталей и малую шероховатость поверхности. На практике выбор показателей и параметров обрабатываемости и их числа в каждом конкретном случае зависит от решаемых технологических задач.

3.2.2. Полимерные композиционные материалы как объект обработки резанием

При обработке ПКМ одним из важнейших показателей обрабатываемости резанием является период стойкости режущего инструмента, который для этой группы материалов во многом определяет экономическую эффективность технологического процесса, а в ряде случаев и принципиальную возможность применения выбранного метода обработки.

Совокупность особенностей ПКМ как объекта обработки резанием позволяет выделить их в особую группу труднообрабатываемых материалов, для которой простой перенос закономерностей процесса резания металлов является неэффективным. Специфика структуры и свойств отдельных разновидностей ПКМ может существенно ограничивать достижимые уровни точности размеров, формы и шероховатости поверхности после механической обработки. Указанные выходные технологические, а также конструктивные параметры зависят от большого числа факторов, их значения колеблются в достаточно широких пределах, что во многих случаях вызывает значительные сложности при обеспечении стабильности эксплуатационных свойств изделий. Это обстоятельство необходимо учитывать как при проектировании, так и при производстве конструкций из ПКМ.

Обеспечение необходимых параметров состояния и показателей качества поверхностного слоя изделия из ПКМ может достигаться целенаправленным управлением термомеха-

ническими характеристиками в зоне резания, правильным выбором метода, вида и режима обработки. Специфические особенности различных видов ПКМ определяют условия их обработки резанием.

При механической обработке резанием в каждом конкретном случае требуется отработка процесса, связанная с обеспечением наиболее благоприятных условий формирования поверхностного слоя, а именно выбором оптимального инструментального материала и геометрии его заточки, обоснованным выбором марки СОЖ, обеспечением высокой жесткости технологической системы, выбором правильной кинематической схемы обработки и назначением рациональных режимов резания. Кроме того, важную роль в повышении обрабатываемости ПКМ резанием играют разработка и применение специальных технологических методов и средств, основанных на непосредственном управлении физико-химическими процессами и явлениями в зоне резания. В этом случае поиск новых технологических решений осуществляют с учетом специфики свойств обрабатываемого материала, от которых зависят качество и технико-экономические показатели обработки.

3.3. Выбор рациональных режимов резания полимерных композиционных материалов при механической обработке резанием

3.3.1. Обработка изделий из стеклопластиков

Точение. *Материал и геометрические параметры резцов.* Точение заготовок из стеклопластиков как материалов с высокими абразивными свойствами производят в основном резцами с пластинами из твердых вольфрамовых (однокарбидных) сплавов с условным обозначением группы — ВК (наиболее рационально применение твердых сплавов марок ВК2, ВК3М, ВК4, ВК6М) с невысоким содержанием кобаль-

та. Перспективными инструментами при точении стеклопластиков, обеспечивающими наивысшую производительность обработки, являются резцы с режущей частью из натуральных или синтетических алмазов. Среди всех инструментальных материалов они имеют наибольшую твердость и наиболее высокую теплопроводность. Применение алмазных резцов обеспечивает наименьшую шероховатость обработанной поверхности и высокую точность размеров деталей при значительной стойкости режущего инструмента. Вместе с тем повышенная хрупкость алмазов ограничивает их применение, особенно в условиях прерывистого резания и при больших сечениях среза. Наиболее эффективно использование алмазных режущих элементов типа АСПК (карбонадо) при глубине резания $t \leq 1$ мм и АСБ (баллас) при $t \leq 2$ мм. Но алмазные резцы трудно перетачивать. В отдельных случаях, например при обработке поверхностей сложного профиля фасонными резцами и малых партиях деталей, целесообразно применять резцы из быстрорежущей стали.

Из геометрических параметров наибольшее влияние на стойкость резцов оказывает главный задний угол α , что объясняется высокой упругостью стеклопластиков, которая приводит к увеличению площади контакта задней поверхности инструмента и заготовки. Вследствие этого при обработке стеклопластиков значения угла α принимают существенно большими, чем при обработке металлов. Выбор значения переднего угла γ более $10...15^\circ$ нецелесообразен, поскольку ухудшаются условия теплоотвода. Радиус r при вершине резца оказывает значительное влияние на шероховатость поверхности, особенно при точении волокнистых стеклопластиков.

В табл. П1 приложения приведены геометрические параметры режущей части резцов, рекомендуемые при наружном точении стеклопластиков различных марок. При растачивании отверстий у расточных резцов задний угол α следует увеличивать примерно на $2...3^\circ$ по сравнению с зад-

ним углом резцов для наружного точения. Чтобы улучшить сход стружки, уменьшить ее налипание на переднюю поверхность резцов, предусматривают плоскую или радиусную форму заточки их передней поверхности, ее доводку и полирование.

В качестве критерия затупления резцов при точении принимают допустимый износ по задней поверхности режущего инструмента h_3 . Значения h_3 , при которых обеспечиваются допустимые изменения шероховатости поверхности и допустимую погрешность формы детали при получистовом и чистовом точении, приведены в табл. П2. При этих значениях критерия затупления оптимальные периоды стойкости быстрорежущих и твердосплавных резцов, как показала практика, составляют соответственно 30 и 60 мин.

При точении алмазными резцами из АСБ стойкость, как правило, принимают равной 360 мин, резцами из АСПК — 540 мин. Если протяженность обрабатываемой поверхности заготовки велика, то период стойкости резца должен быть таким, чтобы резцом можно было обработать не менее одной детали.

Режимы резания. Назначение режимов резания — это выбор комбинации значений скорости резания, глубины резания и подачи, при которой обеспечиваются высокие значения стойкости резцов и производительности обработки при удовлетворении заданных требований к детали. На изнашивание и стойкость резцов наибольшее влияние оказывает скорость резания, несколько меньшее — подача и наименьшее — глубина резания, поэтому при назначении режимов точения сначала выбирают глубину резания, затем подачу и в последнюю очередь — скорость резания.

Глубину резания t , мм, выбирают исходя из припуска на обработку h , мм. Максимальная глубина резания равна припуску на обработку, если нет ограничений по точности и шероховатости поверхности. В противном случае припуск снимают за два рабочих прохода инструмента: черновой и чистовой. Глубину резания при черновом проходе обычно

принимают равной $0,75h$. На чистовую обработку следует оставлять припуск не более $0,25h$, что обеспечит получение заданной точности размеров с большей надежностью. В отдельных случаях при снятии больших припусков (10...15 мм) обработку на токарных станках производят за три и более прохода инструмента.

Подачу S , мм/об, выбирают исходя из требований к шероховатости обработанной поверхности (табл. П3) при условии отсутствия сколов и прижогов на ней.

Скорость резания v , м/с, при точении стеклопластиков ориентировочно может быть назначена в пределах рекомендуемых значений, приведенных в табл. П4. При этом, чем большими выбраны значения глубины резания и подачи, тем меньшую скорость резания следует назначать. Более точно скорость резания при точении можно рассчитать по экспериментально полученным зависимостям $v = f(T, S, t)$ степенного типа (где T — период стойкости режущего инструмента, мин). Значения показателей степеней m , x_v , y_v и постоянной C_v , зависящей от условий обработки отдельных марок стеклопластиков и инструментальных материалов, приведены в табл. П5. По полученным значениям скорости резания определяют расчетную частоту вращения n , с^{-1} , шпинделя станка: $n = 1000v/(\pi D_3)$, где D_3 — диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; найденное значение n корректируют по паспортным данным станка, принимая ближайшее меньшее значение.

При проектировании специальных станков, зажимных станочных приспособлений, а также при оценке коэффициента использования мощности двигателя станка необходимо выполнение силовых расчетов. Главную составляющую P_z силы резания находят по выбранным значениям режимов точения, используя формулу, приведенную в табл. П6, где C_p — постоянная; x_p , y_p — показатели степени. Эффективную мощность N_3 , кВт, затрачиваемую непосредственно на резание, определяют как $N_3 = P_z v \cdot 10^{-3}$.

На основании экспериментальных данных (см. табл. П5, П6) рассчитаны и построены табл. П7 – П15, позволяющие выбирать оптимальную скорость резания v , в ряде случаев определять главную составляющую P_z силы резания и эффективную мощность N_e (см. табл. П7, П10, П11, П15). Поправочные коэффициенты на скорость резания v в зависимости от принятого периода стойкости инструмента T , мин, и марки инструментального материала приведены в табл. П16 и в примечаниях к табл. П8, П9, П15 приложения, используемым для выбора режимов точения.

Сверление. *Материал и геометрические параметры сверл.* При сверлении отверстий диаметром до 30 мм используют спиральные быстрорежущие и твердосплавные сверла для обработки металлов (ГОСТ 10902–77 и ГОСТ 22735–77) с различными вариантами форм заточки режущей части. Материалы режущей части и рекомендуемые геометрические параметры спиральных сверл для обработки стеклопластиков отдельных марок приведены в табл. П17. Кроме того, для сверления в стеклопластике отверстий диаметром 3...600 мм и глубиной до 125 мм могут эффективно применяться различные алмазные инструменты для сквозного и глухого сверления: головки, трубчатые сверла, сверла-коронки и др. Особенностью использования алмазных инструментов является обязательное применение СОЖ или интенсивного отсоса продуктов резания промышленными пылесосами.

В качестве критерия затупления сверл принимают технологические признаки: появление сколов, трещин и отслоений материала на входе сверла в отверстие и выходе из него, появление прижогов на обработанной поверхности, обильное выделение газов, отклонение размеров отверстий от заданных чертежом. В соответствии с этим задается значение допустимого износа по задним поверхностям $h_3 = 0,1...0,3$ мм. Малое значение h_3 при сверлении объясняется интенсивным увеличением сил резания, температур, изменением размеров отверстий при износе более 0,1 мм.

В зависимости от диаметра D сверла период его стойкости можно выбрать по следующим зависимостям: $T = (0,5...2)D$ для быстрорежущих сверл; $T = (2...3)D$ для твердосплавных сверл. Стойкость сверл диаметром до 4 мм принимают ниже указанных значений и оценивают, как правило, числом просверленных отверстий.

Режимы резания. В табл. П18 приведены рекомендуемые значения подачи при сверлении стеклопластиков быстрорежущими и твердосплавными сверлами в зависимости от требуемой шероховатости обработанной поверхности и при отсутствии сколов. Меньшие значения подачи следует выбирать для сверл малого диаметра, большие — для сверл большого диаметра.

Скорость резания при сверлении ориентировочно может быть принята согласно данным табл. П19. Более точно значения скорости резания для различных обрабатываемых материалов и марок инструментального материала определяют по формуле $v = f(T, S, D)$ с использованием приведенных в табл. П20 значений постоянных C_v , m , x_v , y_v . Полученные расчетом режимы сверления для ряда конкретных условий обработки приведены в табл. П21 – П27. Поправочные коэффициенты на скорость резания в зависимости от выбранного периода стойкости сверл T , мин, выраженного через диаметр инструмента D , мм, представлены в табл. П28.

Фрезерование. *Материал и геометрические параметры фрез.* Для фрезерования стеклопластиков рекомендуется применять фрезы, оснащенные пластинами из твердых вольфрамовых сплавов группы ВК и из синтетических алмазов АСБ, АСПК. Оптимальным сплавом является твердый сплав ВК4, имеющий большую теплопроводность по сравнению со сплавами ВК6, ВК8 и менее хрупкий по сравнению со сплавом ВК2. Стойкость алмазных фрез в 15–30 раз выше стойкости твердосплавных фрез, допустимая скорость резания соответственно больше в 1,5–2,0 раза при более высоком качестве обработанной поверхности. В единичном и мелко-

серийном производстве допускается применение быстрорежущих фрез из сталей Р6М5 и Р12.

Конструктивные и геометрические параметры режущей части фрез для обработки стеклопластиков в настоящее время не стандартизированы. Рекомендуемые с учетом особенностей процесса резания стеклопластиков геометрические параметры фрез приведены в табл. П29.

За критерий затупления зубьев фрез принимают такое значение допустимого износа фрезы по задней поверхности h_z , мм, при котором режущая способность зуба резко снижается: появляются сколы, прижоги, ухудшается состояние поверхностного слоя. В соответствии с этим рекомендуется принимать в качестве критерия затупления значение $h_z = 0,25...0,30$ мм; для быстрорежущих фрез в целях повышения периода стойкости инструмента это значение может быть увеличено до $0,35...0,45$ мм.

Период стойкости фрез выбирают в зависимости от вида инструментального материала и диаметра фрезы. Наиболее предпочтительными периодами стойкости принято считать для быстрорежущих фрез $T = 60$ мин, для твердосплавных фрез $T = 240$ мин, для торцовых фрез со вставками из АСБ $T = 720$ мин.

Режимы резания. Подачу S_z , мм/зуб, на один зуб фрезы выбирают в зависимости от заданной шероховатости поверхности и точности обработки. Следует учитывать, что при $S_z > 0,25$ мм/зуб увеличивается вероятность появления сколов на кромках обрабатываемых поверхностей; при $S_z < 0,03$ мм/зуб прижоги могут появляться уже при небольшом износе зуба фрезы. Значения подачи в зависимости от шероховатости поверхности приведены в табл. П30.

Ориентировочно скорость резания для различных видов фрезерования может быть выбрана по табл. П31. Более точно скорость резания для ряда обрабатываемых материалов определяют по формулам $v = f(T, t, S_z)$ или $v = f(T, t, S_z, D)$ с использованием данных табл. П32. В табл. П33 – П36 приве-

дены полученные расчетом режимы фрезерования стеклопластиков различными типами фрез. Поправочные коэффициенты на скорость фрезерования в зависимости от периода стойкости инструмента приведены в табл. ПЗ7.

3.3.2. Обработка изделий из углепластиков, органопластиков и боропластиков

В настоящее время находят применение разнообразные конструкционные угле-, органо- и боропластики, различающиеся по составу и физико-механическим свойствам. Имеющиеся опытные данные по механической обработке этих материалов крайне ограничены, что не позволяет представить детальные рекомендации по выбору режимов резания отдельных марок указанных материалов при выполнении различных операций. В связи с этим в настоящем пособии приведены средние количественные характеристики обрабатываемости каждого из указанных материалов, которые позволяют, не допуская грубой ошибки, осуществить предварительный выбор режимов резания конкретного материала. При окончательной отработке технологии механической обработки в заводских условиях предварительно установленные параметры режимов резания уточняют.

В качестве инструментального материала при обработке резанием углепластиков рекомендуется применять вольфрамовые твердые сплавы марок ВК2, ВК4, ВКЗМ, ВК6, ВК8. Сплавы с высоким содержанием кобальта (например, ВК8) менее износостойки, но лучше воспринимают динамические нагрузки. Обработку органопластиков благодаря низкой твердости армирующих волокон можно производить инструментом не только из твердого сплава, но и из быстрорежущих сталей Р9, Р12, Р6М5 и др.

Особое место среди ПКМ занимают боропластики: по микротвердости волокна бора превосходят быстрорежущие стали и твердые сплавы, поэтому для резания боропластиков

могут применяться только СТМ — натуральные и синтетические алмазы, эльбор и т. п. Однако и в этом случае сохраняется проблема обработки боропластиков, поскольку соотношение значений микротвердости инструментального и обрабатываемого материалов остается низким (около 2,5) и не обеспечивает эффективного осуществления процесса резания.

Точение. Геометрические параметры резцов и их изнашивание при точении угле-, органо- и боропластиков оказывают большое влияние на качество поверхностного слоя, в отдельных случаях вызывая расслоение материала, образование сколов, прижогов, подрыв армирующих нитей, их разломачивание, появление ворсистости на обработанной поверхности. С учетом указанных факторов установлены геометрические параметры режущей части инструмента для наружного точения (табл. П38), а также определены критерии износа резцов по задней поверхности (значения h_3 , мм) при чистовой обработке (или обработке за один проход) и черновой обработке, когда необходима последующая чистовая обработка (табл. П39).

При назначении режимов точения угле- и органопластиков выбор значения подачи S , мм/об, при котором обеспечивается требуемое значение параметра Ra или Rz шероховатости поверхности, может быть осуществлен по табл. П40. Влияние на параметры шероховатости скорости резания и степени затупления резца учитывают с помощью поправочных коэффициентов: значения Ra или Rz , взятые согласно табл. П40, должны быть умножены на соответствующий коэффициент $K_{Ray}K_{Rah}$ или $K_{Rzv}K_{Rzh}$ (табл. П41).

Рациональную скорость резания выбирают по табл. П42. Влияние на скорость резания условий обработки (марка инструментального материала, период стойкости инструмента или тип резца) учитывают, как и в случае определения Ra и Rz , умножая значения скорости на соответствующие поправочные коэффициенты (табл. П43).

При точении конструкционного боропластика резцами-вставками из СТМ ориентировочно можно рекомендовать следующий режим резания: $v = 1,5...1,7$ м/с; $S = 0,07...0,12$ мм/об; $t = 0,2...1,0$ мм. Тогда период стойкости инструмента будет составлять для двухслойных пластин БПА-28 и БПА-15В примерно 16 и 12 мин соответственно, для киборита — около 10 мин, для эльбора-Р — около 7 мин.

Сверление. Конструкция режущей части сверл, применяемых для получения отверстий в угле- и боропластиках, оказывает большое влияние на точность и качество обработанной поверхности, стойкость и прочность инструмента. Оптимальные геометрические параметры сверл и значения h_3 (критерии затупления сверл) в зависимости от обрабатываемого и инструментального материалов могут быть выбраны в соответствии с табл. П44. Для уменьшения изнашивания сверл и улучшения условий схода стружки винтовые канавки инструмента рекомендуется полировать.

При назначении режимов сверления подачу в зависимости от заданного параметра Rz шероховатости поверхности определяют по табл. П45. В зависимости от принятой скорости резания значения Rz (см. табл. П45) умножают на поправочный коэффициент K_{Rzv} (табл. П46). Скорость резания находят с учетом значения подачи и диаметра сверла в соответствии с данными табл. П47. Поправочные коэффициенты на скорость резания в зависимости от марки инструментального материала, выбранного периода стойкости инструмента и глубины сверления приведены в табл. П48. При сверлении боропластиков период стойкости сверл из твердого сплава крайне непродолжителен (до 2 мин), поэтому применение таких сверл допустимо лишь при обработке малого числа отверстий. В условиях серийного производства рекомендуют использовать специальные алмазные сверла.

Фрезерование. В изделиях из конструкционных угле-, органо- и боропластиков фрезерованием чаще всего обрабатывают пазы, окна, лючки и т. п. При этом применяют кон-

цевые, дисковые и торцовые фрезы, реже — цилиндрические фрезы.

Геометрические параметры различных типов фрез с режущей частью из твердого сплава и синтетического алмаза АСБ для обработки углепластиков приведены в табл. П49. За критерий износа всех типов твердосплавных фрез принимают их износ по задней поверхности зуба $h_3 = 0,2...0,3$ мм для чистовых операций и $h_3 = 0,5...0,6$ мм для черновых операций. Допустимый износ фрез со вставками из АСБ принимают равным $h_3 = 0,3$ мм.

При выборе режима обработки назначают подачу на зуб и скорость резания, при которой обеспечивается требуемая стойкость инструмента, так как глубина резания и ширина фрезерования определяются видом фрезерования и припуском на обработку. Подачу на зуб фрезы при обработке углепластиков находят исходя из требуемого параметра шероховатости в соответствии с данными табл. П50, скорость резания — с помощью табл. П51. Поправочные коэффициенты на скорость резания в зависимости от условий обработки приведены в табл. П52.

Фрезерование боропластиков твердосплавными фрезами практически невозможно по причине их катастрофически быстрого изнашивания. Обработку в ограниченных объемах можно производить фрезами, оснащенными вставками из синтетического алмаза АСБ, при этом режимы обработки выбирают по табл. П51 для соответствующего инструментального материала. Однако стойкость инструмента и со вставками из СТМ при фрезеровании боропластиков остается неудовлетворительной ($T = 1...2$ мин).

Для обработки пазов в боропластиках разработан специальный алмазный инструмент, работающий по принципу абразивных инструментов. Такой инструмент, оснащенный алмазоносным слоем из АСБ зернистостью не менее 400/315, на режимах $n \geq 9000$ об/мин ($D = 50$ мм), $S \leq 0,0135$ мм/об и интенсивном охлаждении обеспечивает получение

пазов правильной формы с шероховатостью поверхности $R_z \leq 20$ мкм.

3.4. Реновация изделий из полимерных композиционных материалов

Качество ремонта изделий из ПКМ зависит от подготовки и чистоты соединяемых поверхностей, исходного и используемого для восстановления материала. При ремонте изделий на основе реактопластов (полиэфирных, эпоксидных и фурановых смол) склеиванием ремонтируемого и нового КМ необходимо обеспечить требуемые адгезионные свойства связующего, что достигается тщательной подготовкой склеиваемых поверхностей. Для уменьшения рабочих напряжений в клеевом шве необходимо, чтобы площадь склеиваемой поверхности была по возможности максимально большой. Например, при восстановлении сквозного повреждения корпусной детали или панели, толщина стенки которой составляет 6 мм, оптимальный диаметр подготавливаемого участка поверхности вокруг отверстия должен быть в 10–12 раз больше толщины корпуса, т. е. 60...70 мм. Этот участок выполняют скошенным от края отверстия, и его толщина на расстоянии 60...70 мм от образовавшегося отверстия должна сравняться с толщиной изделия (рис. 3.4, *a*).

Скошенные участки поверхности обрабатывают с достаточно высокой точностью, так, чтобы скос был равномерным по всей окружности. Если корпус сделан из многослойного материала, то след пучков ровинга часто используют в качестве контурной линии (как на географической карте), поскольку каждый слой имеет определенную толщину, а расстоянием между контурными линиями определяется наклон обработанной режущим инструментом поверхности.

Если контурные линии расположены параллельно и эквидистантно (на одинаковом расстоянии друг от друга), то геометрия обработанной поверхности выполнена правильно и

качество ремонта будет хорошим. Если же контурные линии расположены так, как показано на рис. 3.4, б (справа), то после склеивания напряжения не будут равномерно распределены по поверхности, что даст максимум в точке наибольшего сближения контурных линий и может вызвать разрушение отремонтированного участка изделия.

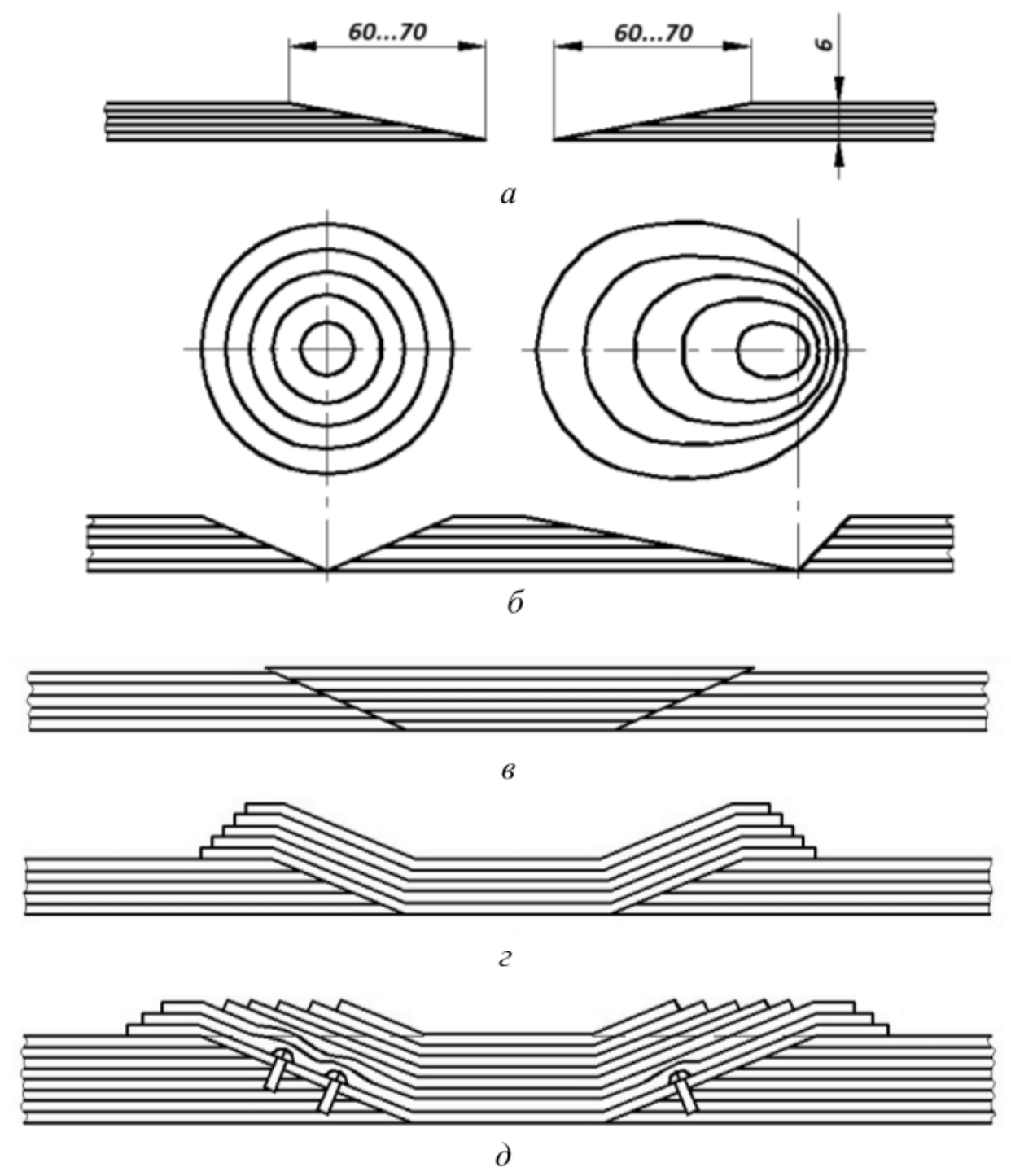


Рис. 3.4. Примеры подготовки поврежденного участка (а, б) и варианты восстановления изделия (в, г, д)

Чистота подготовленной под склеивание поверхности — исключительно важный фактор при выполнении ремонтных работ. Все слои материала даже через день после их обработки резанием или пескоструйной обработки могут иметь посторонние включения, например осевшие из воздуха взвешенные мельчайшие частицы различных веществ. В связи с этим для предотвращения загрязнения ремонтируемых участков ремонтные работы рекомендуют выполнять сразу после подготовки поверхностей. Если по какой-либо причине ремонт откладывается, то подготовленную поверхность, не прикасаясь к ней, следует закрыть бумагой.

Различают два основных типа ремонта: косметический и конструкционный. Косметический ремонт заключается в выполнении сравнительно простых операций по замене наружного слоя, представляющего собой компоненты полимерной матрицы, с последующим восстановлением формы и фактуры поверхности детали. Конструкционный ремонт «индивидуален», так как в каждом случае возникают свои трудности и особенности, требующие различной последовательности операций и разных подходов. Но безотносительно к этим различиям новый материал всегда приклеивают к исходному КМ, соблюдая правила подготовки поверхностей.

Восстановление неотчетственных изделий может быть выполнено заменой слоев ткани или ровинга (рис. 3.4, в). Такой ремонт сводится к удалению сместившегося куска материала и укладке его на прежнее место в то же положение, какое он занимал до повреждения. Однако при этом прочность отреставрированного участка оказывается значительно ниже исходной прочности. Более прочное клеевое соединение получают при использовании кусков нового пленочного или тканого материала, который вводится в исходное изделие таким образом, чтобы прочность соединения была максимальной. В этом случае новый материал должен быть уложен параллельно поверхности (рис. 3.4, г). При такой укладке удастся почти полностью избежать снижения прочности ма-

териала в результате неравномерного распределения связующего в пограничном слое. Если «заплата» не должна обязательно находиться в одной плоскости с ремонтируемым материалом, то рекомендуют закрыть поврежденный участок накладкой с напуском, сведя на конус выступающие края материала.

В случае эксплуатации изделий в условиях высоких рабочих нагрузок или интенсивных вибраций необходимо обеспечить максимальную прочность отремонтированных участков поверхности. При этом только адгезионной прочности связующего может оказаться недостаточно — тогда применяют «анкерные винты». При таком ремонте поверхность под склеивание обрабатывают с уклоном $6...7^\circ$. Затем на наклонной поверхности детали просверливают несколько направляющих отверстий под винты (рис. 3.4, д), которые обычно применяют для крепления конструкций из листовых материалов. После этого восстанавливаемую поверхность покрывают связующим веществом и укладывают на нее несколько слоев тканого армирующего материала, пропитанного связующим. Устанавливают винты в отверстия и заполняют оставшуюся полость ремонтным КМ. После отверждения ремонтируемый участок выравнивают в случае необходимости до совпадения с исходной поверхностью, покрывают смесью связующего с катализатором и еще одним слоем КМ, выступающего на 50...80 мм за края «заплат».

При косметическом ремонте деталей, полученных формованием ручной укладкой и напылением, на поврежденный участок поверхности наносят слой жидкого связующего и дают ему время на отверждение (полимеризацию), в течение которого происходит сшивание полимерных макромолекул.

В некоторых случаях реновируемую поверхность грунтуют, а затем обрабатывают напылением полиэфирной, полиуретановой или эпоксидной смолой, полностью перехо-

дящей в твердое состояние под воздействием отверждающих агентов.

После отверждения последнего наружного слоя связующего реновируемую поверхность изделия шлифуют, используя последовательно несколько абразивных материалов, — на каждом новом технологическом переходе используют абразивный материал с меньшим размером зерен (зернистостью). Окончательной операцией может быть глянецвание, которое осуществляют при слабом прижатии к отшлифованной поверхности войлочного полировального круга, шаржированного пастой, содержащей абразивный материал малой зернистости. После глянецвания поверхность промывают и сушат, при необходимости — парафинуют.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности механической обработки ПКМ?
2. Какие дефекты обработки резанием обусловлены неоднородностью строения и структурной анизотропией КМ?
3. В чем выражается термомеханическая деструкция поверхностного слоя КМ?
4. К чему приводят высокие упругие характеристики ПКМ при резании материала?
5. Как отражается гигроскопичность КМ на условиях обработки их резанием?
6. Какие трудности при резании ПКМ связаны с образованием стружки?
7. Какие свойства ПКМ являются благоприятными для обработки резанием?
8. Чем обусловлена необходимость механической обработки резанием после первичного формообразования изделий из КМ?
9. Что включает в себя понятие «обрабатываемость резанием»?

10. Какие показатели используют для оценки обрабатываемости резанием?
11. Какие группы инструментальных материалов являются наиболее эффективными при резании ПКМ?
12. Как назначают рациональный режим резания?
13. От каких факторов зависит качество ремонта изделий из ПКМ склеиванием?
14. Что обеспечивает равномерность распределения рабочих напряжений в восстановленной детали конструкции?
15. Чем отличается косметический ремонт от конструкционного?
16. В чем состоят особенности ремонта высоконагруженных деталей конструкций из ПКМ?
17. Какие работы относят к заключительным отделочным операциям при ремонте деталей из ПКМ?

4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Выделение КМ в особую группу труднообрабатываемых материалов, обусловленное их строением, физико-механическими, химическими и технологическими свойствами, собственными закономерностями протекания процесса резания и формирования свойств обработанной поверхности, не позволяет напрямую эффективно использовать большой объем научно-теоретических наработок, накопленный промышленный опыт и существующие технологические рекомендации по обработке резанием металлов. Для совершенствования технологий обработки КМ, повышения надежности обеспечения качества изделий и снижения производственных затрат требуется непрерывное расширение базы знаний, изучение процесса резания, познание новых, ранее не исследованных или неизвестных процессов и явлений физико-химического механизма взаимодействия инструмента и заготовки, изыскания приоритетных направлений энергетических воздействий на обрабатываемый материал при его обработке.

4.1. Процесс образования стружки при резании полимерных композиционных материалов с волокнистыми наполнителями

Рассмотрим общие закономерности образования стружки и формирования обрабатываемой поверхности при резании

ПКМ. Процесс удаления срезаемого слоя в указанных материалах отличается дискретностью и может быть представлен следующими основными стадиями деформирования и разрушения (рис. 4.1).

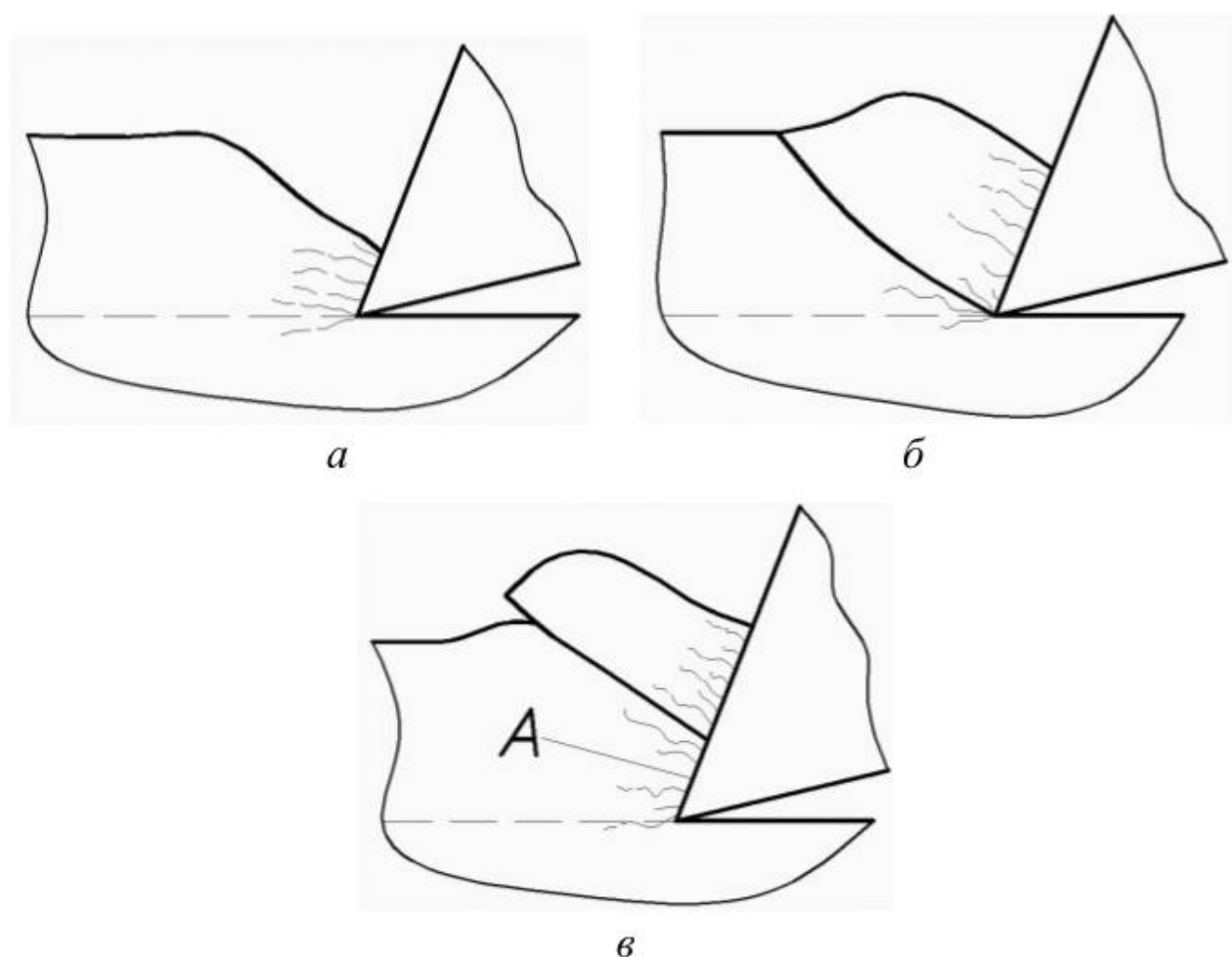


Рис. 4.1. Схема процесса образования стружки при точении органопластиков:

а, б, в — последовательные стадии стружкообразования

В начальный момент внедрения инструмента происходит сжатие обрабатываемого материала, сопровождающееся смятием контактных слоев (рис. 4.1, *а*) и увеличением площади контакта инструмента с заготовкой. При этом в области режущей кромки образуется сетка микротрещин, которые вызывают локальное разрыхление связующего и создают условия для разрушения срезаемого слоя в целом. По мере увеличения сопротивления деформированию в определенный

момент наступает хрупкое разрушение матрицы (рис. 4.1, б), образуется зона сдвига (плоскость скалывания). Разрушение матрицы вызывает перераспределение нагрузки, которая воспринимается армирующими волокнами. Дальнейшее перемещение инструмента приводит к смещению образовавшегося элемента стружки вдоль плоскости скалывания, что обуславливает дополнительное нагружение пересекающих зону сдвига волокон, нарушение адгезионных связей с матрицей одних волокон и разрушение (разрыв) других, длина которых в образующемся элементе стружки превышает критическую («длину включения») для конкретного материала. В процессе смещения элемента стружки одновременно происходит смятие материала срезаемого слоя в области *A* (рис. 4.1, в), что является началом образования нового элемента стружки. Рассмотренный процесс в дальнейшем периодически повторяется. При обработке КМ с арматурой из малопластичных материалов сетка микротрещин в области режущей кромки в некоторых случаях приводит к практически одновременному образованию сразу двух плоскостей скалывания (рис. 4.2), по которым последовательно отделяются два элемента стружки. Все стадии удаления срезаемого слоя сопровождаются диспергированием материала, образованием мелких кусочков связующего с обрывками волокон и пыли.

Сравнивая описанный процесс со стружкообразованием при резании металлов, можно отметить, что во многом он несет в себе признаки образования элементной стружки и одновременно стружки надлома. Вместе с тем отдельные элементы и частицы удаляемого материала, как правило, остаются связанными между собой обрывками волокон наполнителя (см. рис. 3.3, а), т. е. стружка сходит в виде непрерывной ленты. Образованию стружки сопутствует возникновение мелких частиц материала и пыли (см. рис. 3.3, б). По мере увеличения ширины площадки износа по задней поверхности инструмента связь между отдельными элементами стружки становится менее прочной. При достижении определенной степени износа

инструмента стружка начинает распадаться на мелкие кусочки разной величины. Такой тип стружки характерен для точения, сверления и фрезерования (на длине рабочего участка от точки входа до выхода лезвия).

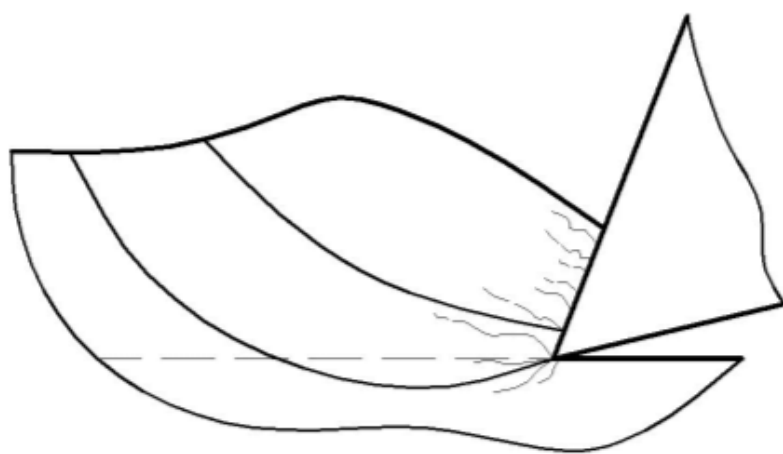


Рис. 4.2. Одновременное образование двух плоскостей скалывания

Вид стружки, ее геометрические характеристики, степень диспергирования материала срезаемого слоя, динамические и микромеханические процессы в зоне стружкообразования зависят от многих факторов: физико-механических свойств и геометрических характеристик наполнителя, свойств связующего, строения КМ, технологического метода и режимных параметров первичного формообразования, расположения волокон относительно направления движения режущего инструмента и других условий обработки.

Процесс стружкообразования непосредственно связан с формированием поверхностного слоя обработанной поверхности, от состояния которого зависят качество изделия и его эксплуатационные характеристики в целом.

При резании ПКМ с дискретными армирующими волокнами, отличающихся низкой пластичностью (угле-, стеклопластики, КМ марок ДСВ-2-2М-П, РТМ-6 и др.), на обработанной поверхности систематически образуются микротрещины типа надрезов, направленные примерно перпендикулярно линии среза $a-a$ (рис. 4.3). В этом случае можно говорить о

формировании на обработанной поверхности дефектного слоя определенной глубины. Это явление связано с высокими упругими деформациями ПКМ в зоне стружкообразования, особенно в области контакта задней поверхности инструмента с обрабатываемой заготовкой. Упругое восстановление материала приводит к увеличению площади контакта. На стыке трения развиваются высокие контактные давления и температуры и, как следствие, большие касательные напряжения в направлении движения резания, которые могут вызвать разрушение поверхностного слоя материала, испытывающего растягивающие напряжения. Интенсивность проявления рассмотренных процессов зависит от индивидуальных особенностей обрабатываемого КМ.

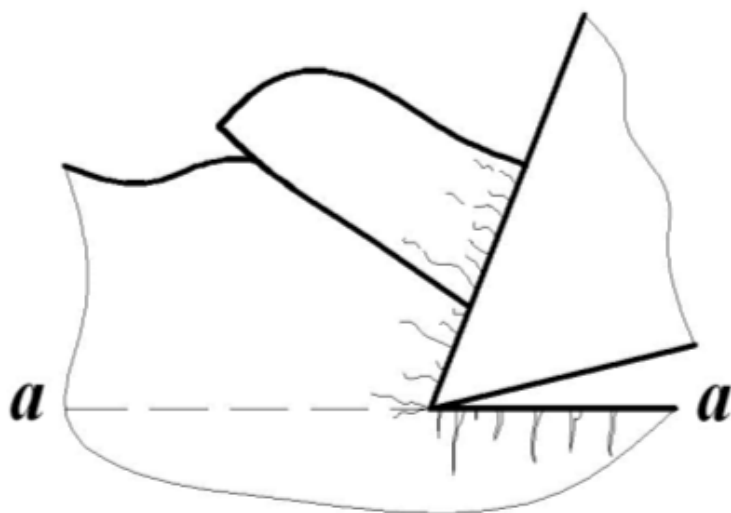


Рис. 4.3. Образование микротрещин на обработанной поверхности

У некоторых марок КМ (например, ДСВ-2-2М-П) сетка микротрещин в области режущего лезвия может развиваться в макротрещину, расположенную существенно ниже линии среза (рис. 4.4, *а*). На выходе режущего инструмента такая макротрещина превращается в «магистральную», резко уходит за пределы зоны стружкообразования и вызывает скол материала на части обработанной поверхности (рис. 4.4, *б*). Размеры об-

разующихся сколов существенно зависят от ряда факторов, в первую очередь, параметров режима резания, геометрических параметров лезвия и степени износа режущего инструмента. Например, при резании КМ марки ДСВ-2-2М-П оптимальными условиями обработки, позволяющими минимизировать размеры сколов (длину, ширину и глубину) на обработанной поверхности при выходе инструмента, являются следующие: 1) режим резания $v = 1,4 \dots 1,8$ м/с; $S \leq 0,1$ мм/об; $t \leq 1,5$ мм; 2) геометрические параметры резца $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 20^\circ$, $\varphi = \varphi_1 = 15^\circ$; $r = 1$ мм; 3) критерий затупления инструмента — размер фаски износа инструмента по задней поверхности $h_3 \leq 0,4$ мм.

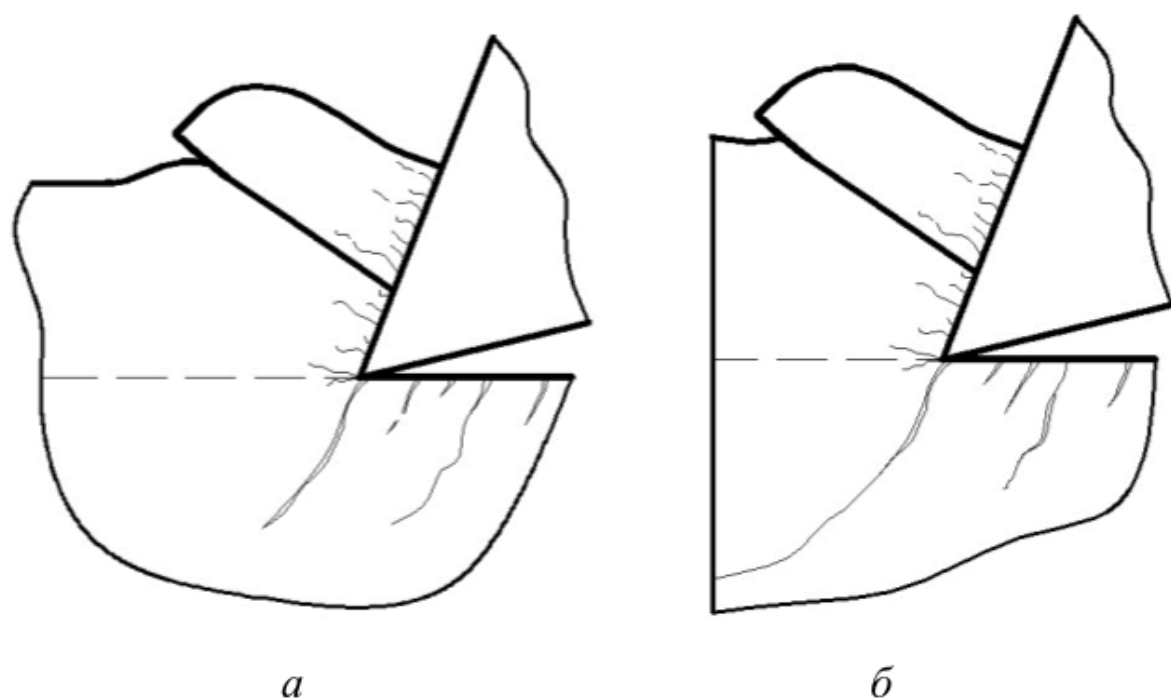


Рис. 4.4. Образование макротрещин на обработанной поверхности (а) и сколов материала (б) на выходе режущего инструмента

Процесс стружкообразования при резании ПКМ, армированных непрерывными волокнами, может иметь существенные отличия. Это особенно наглядно проявляется при обработке КМ на основе органических волокон — арамидных полимеров (Армос, СВМ, Терлон и др.) и полиэтилена.

Органические волокна, или органоволокна, отличаются высокой удельной прочностью, сравнительно хорошей пластичностью (предельной деформацией), но совмещаются с полимерными связующими хуже, чем стеклянные, углеродные или борные волокна. Адгезионная связь органических волокон со связующим веществом является менее прочной. Это обстоятельство отражается на микромеханике процессов деформирования и разрушения в зоне стружкообразования, оказывает большое влияние на качество обработанной резанием поверхности, в том числе непосредственно связано с механизмом образования ворса на поверхности изделия после механической обработки.

Качество обработанной поверхности определяется условиями перерезания армирующих волокон и разрушения матрицы КМ на линии среза, т. е. на траектории перемещения режущих кромок инструмента. На стадии образования в зоне резания поверхности скола и последующего смещения нового элемента стружки вдоль этой поверхности (см. рис. 4.1, б) происходит непрерывное увеличение нагрузки на органоволокна, при этом часть их разрушается. Микромеханика разрушения органических волокон носит сложный микрофибриллярный характер.

До момента разрыва органоволокно под воздействием растягивающих напряжений деформируется в продольном и поперечном направлениях, что вызывает нарушение адгезионной связи его со связующим веществом. Таким образом, перерезание органоволокон, расположенных под углом к поверхности резания, будет сопровождаться изменением структуры наружного слоя формирующейся при обработке поверхности. В результате локального расслоения наполнителя и связующего образуется дефектный, относительно «рыхлый» слой с пониженными физико-механическими свойствами. При интенсификации режима обработки на поверхности могут наблюдаться «вырывы» — участки с отслоившимся связующим, потерявшим контакт с волокнами наполнителя.

Разрушение отдельных органоволокон происходит в так называемых слабых точках (поры, поврежденные элементы полимерной цепи и др.). Дефекты структуры наблюдаются не только на поверхности, но и внутри органо волокна. При растяжении органическое волокно на определенной стадии нагружения расщепляется в продольном направлении на микрофибриллы, которые при увеличении нагрузки разрываются на разных уровнях по длине волокна в наиболее слабых сечениях. В результате разорванное волокно дает пучок микрофибрилл разной длины. Часть разрушенных в зоне резания волокон будет располагаться ниже линии среза, в наружном слое обработанной поверхности. От их наличия зависит уровень дефектности поверхностного слоя изделия. Другие волокна разрушаются выше линии среза и испытывают в зоне резания дополнительное воздействие режущего клина. В процессе перемещения контактные поверхности инструмента прижимают выступающие волокна к формируемой поверхности заготовки и сплющивают их. Однако при поперечном сжатии органоволокон они остаются в основном не разрушенными в поперечном направлении, но могут образовать новые микрофибриллы в осевом сечении нити (с поверхности нити могут отщепиться новые микрофибриллы). После разгрузки зоны резания выступающие органо волокна и микрофибриллы проявляются в виде так называемой ворсистости обработанной поверхности. Удаление ворсистости — серьезная проблема механической обработки органопластиков резанием.

В зоне стружкообразования разрушаются не все органо волокна, а только те, у которых прочность адгезионных связей со связующим выше, чем прочность при растяжении. При недостаточной силе адгезии (если длина волокна меньше критической) армирующее волокно будет под воздействием силовых факторов вытягиваться из связующего. Этому в значительной степени способствует диспергирование связующего в зоне стружкообразования. «Уцелевшие» органо волокна после воздействия на них режущего инструмента образуют на обрабо-

танной поверхности изделия ворс подобно органоволокнам, разрушенным в зоне обработки выше линии среза.

При неблагоприятных условиях обработки действие силы трения на задней поверхности инструмента приводит к смещению элементарных объемов материала поверхностного слоя в направлении движения резания, что вызывает образование микротрещин на поверхности изделия. Направление таких «надрезов», как правило, совпадает с направлением пучков органоволокон, пересекающих под углом линию среза. Образованию микротрещин способствуют высокая прочность органоволокон при растяжении, относительно слабая связь с матрицей, высокие упругие свойства КМ, большое число выступающих фибрилл, образующих ворс. По характеру обработанной поверхности можно судить как о прочности самих органоволокон, так и о качестве адгезии на поверхности раздела «органоволокно — матрица».

Процесс формирования поверхностного слоя при резании стекло-, угле- и боропластиков, армированных непрерывными волокнами, характеризуется теми же стадиями, что и резание органопластиков. Вместе с тем наличие относительно хрупких армирующих волокон позволяет получать после обработки поверхность, лишенную ворса, т. е. основная доля волокон подвергается локальному разрушению по линии среза. Хрупкому разрушению способствует также высокая адгезионная прочность связи угольных, стеклянных и борных волокон с матрицей при воздействии на них режущих кромок инструмента.

4.2. Аналитическое определение силы резания при обработке полимерных композиционных материалов

4.2.1. Механика разрушения волокон наполнителя при точении органопластиков нитевой намотки

Процесс удаления срезаемого слоя при точении КМ, армированных органоволокнами, является дискретным и характеризуется периодическим повторением стадий деформи-

рования и разрушения (см. разд. 4.1), что сопровождается также периодическим изменением значений силы резания при образовании и удалении элементов стружки.

При анализе механики разрушения органоволокон в зоне сдвига, напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования и аналитическом определении максимальных значений силы резания приняты положения о том, что плоскость скалывания является прямолинейной, деформация происходит в узкой зоне с равномерной толщиной δ , процесс деформирования характеризуется геометрическими соотношениями простого сдвига (рис. 4.5). При этом основные закономерности, свойственные условиям прямоугольного свободного резания, сохраняются и при других, более сложных разновидностях процесса резания. Полагают, что армирующие волокна расположены в плоскостях, перпендикулярных режущей кромке инструмента.

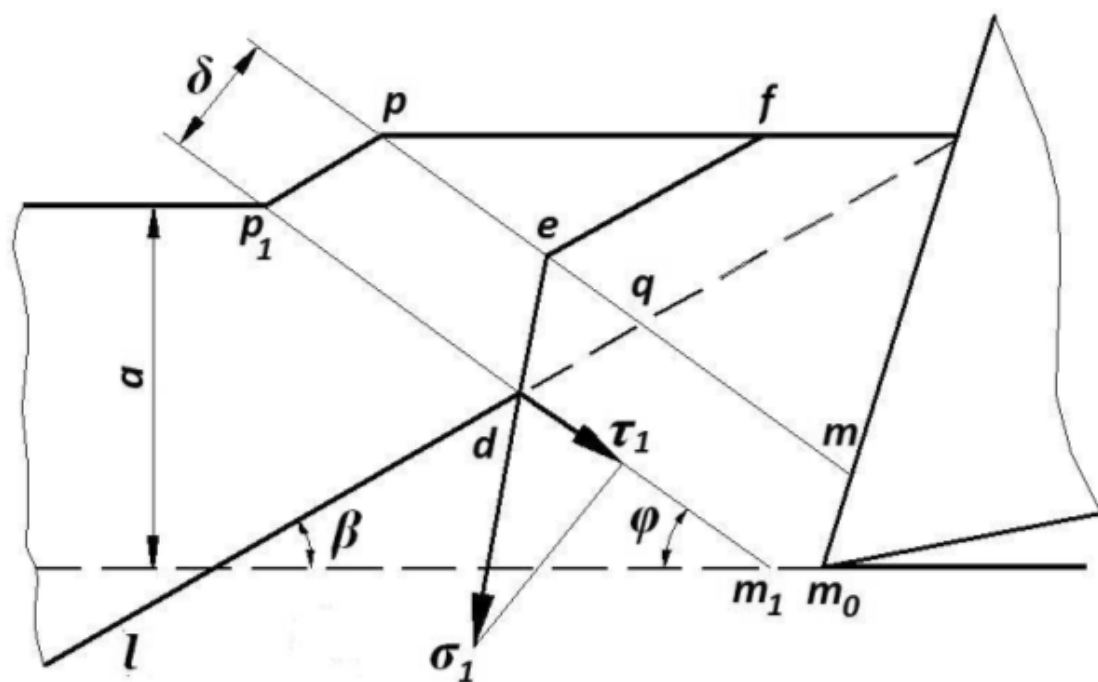


Рис. 4.5. Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния в плоскости скалывания

На рис. 4.5 показано элементарное волокно $ldef$, расположенное под углом β к линии среза и проходящее через зону

сдвига $m_1 m_0 m p p_1$. В процессе деформирования этой зоны участок волокна с начальной длиной dq приобретает длину, равную текущему значению de . Таким образом, если не учитывать влияния изгиба волокон ($\delta \gg d_v$, где d_v — диаметр волокна), можно считать, что напряженно-деформированное состояние отдельного волокна в зоне сдвига определяется одноосным растяжением (сжатием) вдоль его оси, при этом относительная линейная деформация составляет

$$\xi = \frac{de}{dq} - 1.$$

В то же время мерой деформации простого сдвига зоны $m_1 m_0 m p p_1$ является относительный сдвиг, равный отношению абсолютного смещения qe к толщине зоны δ :

$$\varepsilon = \frac{qe}{\delta}.$$

На основе геометрических соотношений (см. рис. 4.5) установлено, что относительная линейная деформация ξ связана с относительным сдвигом ε следующими зависимостями:

$$\zeta = \sin(\varphi + \beta) \sqrt{1 + [\varepsilon - \operatorname{ctg}(\varphi + \beta)]^2} - 1; \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\left[\frac{\zeta + 1}{\sin(\varphi + \beta)} \right]^2 - 1} + \operatorname{ctg}(\varphi + \beta). \quad (4.2)$$

Главная составляющая P_z силы резания при точении рассматриваемого вида КМ выражается как

$$P_z = P_{z1} + P_c + P_3, \quad (4.3)$$

где P_{z1} — сопротивление движению резца, обусловленное силой, действующей в плоскости скалывания; P_c — сопротивление движению резца, определяемое смятием материала

в месте контакта с передней поверхностью инструмента; P_3 — сила трения на задней поверхности инструмента.

Для определения значения P_{z1} используют известную формулу, полученную в предположении существования единственной условной плоскости сдвига, образуемой в процессе стружкообразования при резании:

$$P_{z1} = P_\tau \frac{\cos \omega}{\cos(\omega + \varphi)}, \quad (4.4)$$

где P_τ — сила, действующая вдоль плоскости сдвига; ω — угол действия.

В общем случае силу P_τ выражают в виде произведения:

$$P_\tau = \tau_1 N(\beta) \cdot s \cdot k_N(\beta), \quad (4.5)$$

где τ_1 — сопротивление сдвига в направлении плоскости скалывания, оказываемое единичным волокном; $N(\beta)$ — удельное число волокон заданного направления, приходящееся на единицу площади плоскости скалывания; $s = ab/\sin\varphi$ — площадь плоскости сдвига (a , b — соответственно толщина и ширина срезаемого слоя); $k_N(\beta)$ — коэффициент, позволяющий учесть число «работающих» в каждый момент времени волокон по отношению к общему числу волокон.

Сила τ_1 (см. рис. 4.5) возникает под действием растягивающего напряжения σ_1 в волокне, вызванного его относительной линейной деформацией ξ на участке de . Зависимость силы τ_1 от напряжения σ_1 на различных стадиях деформирования выражается, согласно рис. 4.5, соотношением

$$\tau_1 = \sigma_1 \frac{\varepsilon - \operatorname{ctg}(\varphi + \beta)}{\sqrt{1 + [\varepsilon - \operatorname{ctg}(\varphi + \beta)]^2}}$$

или, после подстановки ε из формулы (4.2), соотношением

$$\tau_1 = \sigma_1 \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi + \beta)}{(\zeta + 1)^2}}, \quad (4.6)$$

причем $\sigma_1 = \sigma(\xi) \cdot s_1$, где $\sigma(\xi)$ — напряжение растяжения волокна; s_1 — площадь сечения элементарного волокна.

Экспериментальная зависимость напряжений от относительных линейных деформаций аппроксимируется, как правило, степенной функцией:

$$\sigma = A\xi^m,$$

в которой постоянные A и m отражают сопротивление материала деформированию и его способность к упрочнению.

Таким образом, формула (4.6) для определения силы τ_1 с учетом величин σ_1 и $\sigma(\xi)$ может быть записана в виде

$$\tau_1 = A \cdot s_1 \xi^m \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi + \beta)}{(\zeta + 1)^2}}. \quad (4.7)$$

Удельное число волокон $N(\beta)$ в плоскости скалывания находят по объемной доле V_B волокон, которая является одной из технологических характеристик материала. Очевидно, что число волокон в единице объема материала составляет V_B/s_1 и численно равно N для плоскости, перпендикулярной оси волокон (угол расположения плоскости $\Psi = 0$). Если плоскость расположена под произвольным углом α , то

$$N(\Psi) = \frac{V_B}{s_1} \cos \Psi.$$

В соответствии с этим для рассматриваемых условий (см. рис. 4.5) имеем

$$N(\beta) = \frac{V_B}{s_1} \sin(\varphi + \beta). \quad (4.8)$$

Коэффициент k_N в формуле (4.5), позволяющий учесть долю «работающих» волокон, можно представить как

$$k_N = k_a(\xi) \cdot k_p(\xi), \quad (4.9)$$

где $k_a(\xi)$ — доля волокон, сохраняющих адгезионную связь с матрицей при текущем значении относительной линейной деформации ξ ; $k_p(\xi)$ — доля волокон, не разрушенных к моменту наступления деформации ξ .

Функция $k_p(\xi)$ отражает статистический характер относительного удлинения ξ_B волокна в момент его разрыва. Известно, что случайная величина ξ_B подчиняется нормальному закону с плотностью распределения

$$f(\xi_B) = \frac{1}{\sigma_\xi \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\xi_B - m_\xi)^2}{2\sigma_\xi^2} \right],$$

где m_ξ и σ_ξ — соответственно математическое ожидание относительного удлинения ξ_B волокна и его среднее квадратическое отклонение. В этом случае при текущем значении относительной линейной деформации ξ доля не разрушенных, «работающих», волокон определяется уравнением

$$k_p(\xi) = \frac{1}{\sigma_\xi \sqrt{2\pi}} \int_{\xi}^{\infty} \exp \left[-\frac{(\xi_B - m_\xi)^2}{2\sigma_\xi^2} \right] d\xi_B,$$

решение которого дает

$$k_p(\xi) = \frac{1}{2} \operatorname{Erfc} \left(-\frac{\xi - m_\xi}{\sqrt{2}\sigma_\xi} \right), \quad (4.10)$$

где $\operatorname{Erfc} x$ — дополнительный интеграл вероятностей (табличная функция).

Подставляя в равенство (4.3) величину P_{z1} из (4.4) и учитывая выражения (4.5), (4.7) – (4.10), а также $s = ab/\sin \varphi$, получим формулу для определения текущего значения главной составляющей силы резания:

$$P_z = \frac{1}{2} AV_B ab \xi^m k_a(\xi) \times$$

$$\times \operatorname{Erfc} \left(\frac{\xi - m_{\xi}}{\sqrt{2}\sigma_{\xi}} \right) \frac{\sin(\varphi + \beta) \cos \omega}{\sin \varphi \cos(\varphi + \omega)} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi + \beta)}{(\xi + 1)}} + P_c + P_3. \quad (4.11)$$

При обработке слоистых КМ, армирующие элементы которых расположены под некоторым углом друг к другу в нескольких параллельных плоскостях, происходит перерезание волокон, расположенных под различными углами $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ относительно поверхности резания. Если укладка срезаемых слоев выполнялась армирующим волокном с одинаковыми геометрическими и физико-механическими свойствами, то выражение (4.11) для определения силы P_z принимает вид

$$P_z = \frac{1}{2} Aab \frac{\cos \omega}{\sin \varphi \cos(\varphi + \omega)} \sum_{i=1}^n \xi_i^m V_{bi} k_a(\xi) \times \\ \times \operatorname{Erfc} \left(\frac{\xi_i + m_{\xi}}{\sqrt{2}\sigma_{\xi}} \right) \sin(\varphi + \beta_i) \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi + \beta_i)}{(\xi_i + 1)^2}} + P_c + P_3, \quad (4.12)$$

где при одинаковом относительном сдвиге ε значения ξ_i можно найти по формуле (4.1) в зависимости от угла β_i .

В приведенных теоретических зависимостях (4.11), (4.12) для главной составляющей P_z силы резания учитываются физико-механические свойства обрабатываемого материала и инструмента ($A, m, m_{\xi}, \sigma_{\xi}, \omega$), их конструктивно-технологические параметры (V_b, β, γ), геометрические параметры срезаемого слоя (a, b), а также особенности процесса стружкообразования при обработке КМ, получаемых намоткой ($\varphi, k_a(\xi), P_c, P_3$).

Анализ формул (4.11) и (4.12) показывает, что наблюдаемые на практике существенные колебания значений силы резания вызываются дискретностью процесса стружкообразования и обусловлены конструктивными особенностями рассматриваемого вида материалов. Аналитические выражения дают представление об основных направлениях совер-

шенствования и отработки процесса резания КМ, армированных волокнистыми наполнителями.

4.2.2. Расчет силы резания при обработке композиционных материалов на основе органических волокон с учетом температурного фактора

Точность и качество обработки поверхности резанием в значительной мере определяются силой и температурой этого процесса. Аналитические зависимости для главной составляющей P_z силы резания (4.11), (4.12) удовлетворительно подтверждаются экспериментами, выполненными при малых скоростях резания (до 6 мм/с). Однако для рекомендуемых при точении ПКМ скоростей резания значение P_z существенно отличается от расчетного. Это объясняется влиянием температурного фактора при реальных условиях обработки.

Изменение значения P_z под воздействием температур, развивающихся в зоне резания, будем рассматривать, как и в подразд. 4.2.1, для условий прямоугольного свободного резания; будем также считать, что механизм образования стружки при лезвийной обработке материалов типа органопластиков является дискретным. К основным стадиям процесса деформирования и отделения материала в виде стружки относятся периодическое смятие контактных слоев стружки, разрушение матрицы с образованием зоны сдвига и смещение образовавшегося элемента стружки вдоль плоскости скалывания. Максимальное сопротивление резанию возникает на стадии сдвига элемента стружки, когда основную нагрузку воспринимают волокна, пересекающие плоскость скалывания.

При деформации зоны сдвига $m_1 m_0 m_{pp1}$ (рис. 4.6) толщиной δ участок dc элементарного волокна l_{def} становится равным текущей длине de . При этом напряженно-деформированное состояние отдельного волокна характеризуется одноосным растяжением (сжатием).

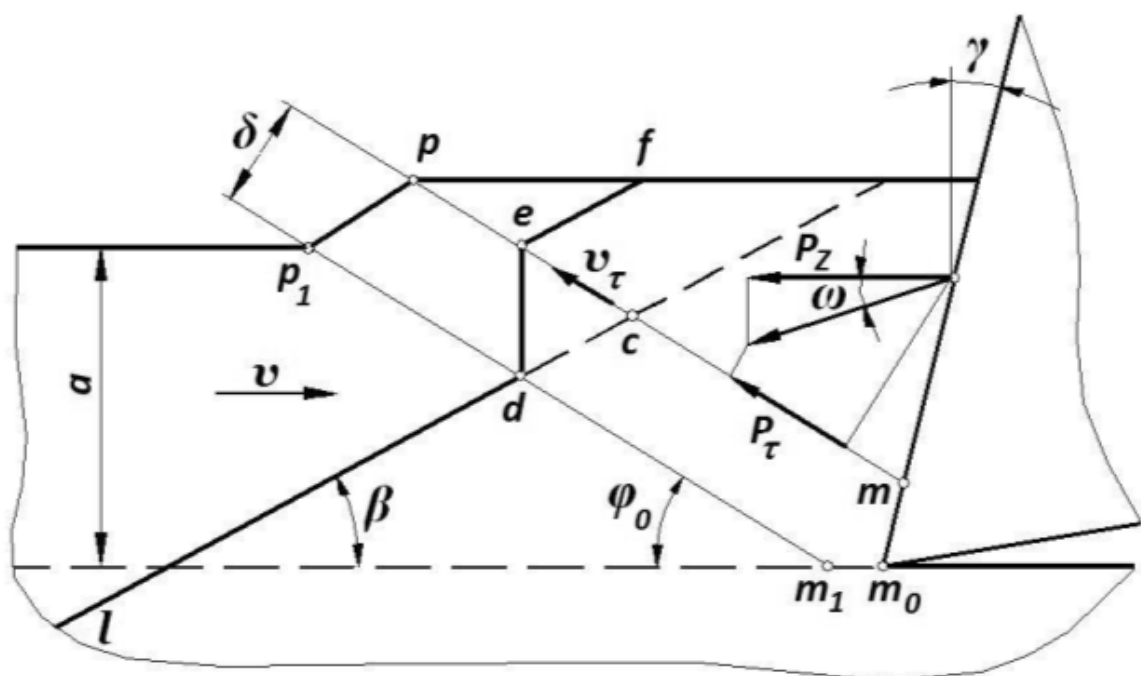


Рис. 4.6. Схема для определения главной составляющей P_z силы резания

Механическая работа, которая затрачивается в зоне стружкообразования на деформирование и разрушение материала, практически полностью переходит в теплоту. Вследствие чрезвычайно высоких скоростей деформирования при резании и теплоизолирующих свойств КМ выделившаяся в зоне резания теплота локализуется в тех микрообъемах материала, которые в данный момент испытывают действие внешней нагрузки. В зоне обработки происходит концентрация механической и тепловой энергии. При повышении температуры материала в процессе нагружения могут существенно изменяться его механические свойства, что будет отражаться на напряженности процесса резания в целом. Считают, что изменение температуры в процессе сдвига приводит к мгновенному изменению механических свойств материала. В этом случае влияние температуры можно представить следующим образом:

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial \sigma}{\partial \Theta} d\Theta, \quad (4.13)$$

где σ — напряжение; ξ — относительная линейная деформация; Θ — температура.

Поскольку деформация и температура являются функциями времени t , уравнение (4.13) записывают как

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial\xi} \frac{d\xi}{dt} + \frac{\partial\sigma}{\partial\Theta} \frac{d\Theta}{dt}. \quad (4.14)$$

Связь напряжений и деформаций при пластическом деформировании, как правило, выражается степенной функцией:

$$\sigma = A\xi^m, \quad (4.15)$$

где A и m — постоянные. Таким образом,

$$\frac{\partial\sigma}{\partial\xi} = mA\xi^{m-1}. \quad (4.16)$$

Изменение прочности органоволокон с повышением их температуры при некотором допущении представляют линейной зависимостью

$$\frac{\partial\sigma}{\partial\Theta} = -B = \text{const}. \quad (4.17)$$

Интегрируя дифференциальное уравнение (4.14) с учетом соотношений (4.16) и (4.17), получаем

$$\sigma(t) = A\xi^m(t) - B \cdot \Theta(t). \quad (4.18)$$

При определении изменения температуры $\Theta(t)$ зону сдвига рассматривают как непрерывный плоский источник теплоты с переменной интенсивностью теплового потока $q_T(t)$ в направлении, перпендикулярном плоскости скалывания. В этом случае изменение температуры в процессе нагружения волокон выражается уравнением

$$\Theta(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi c_p \rho \lambda}} \int_0^t \frac{q_T(t') dt'}{(t-t')^{0,5}}, \quad (4.19)$$

где c_p — удельная теплоемкость материала; ρ — плотность материала; λ — его коэффициент теплопроводности.

Интенсивность теплового потока, определяемая работой деформирования волокон в плоскости сдвига, выражается соотношением

$$q_{\tau}(t) = \psi \frac{P_{\tau} v_{\tau}}{s}, \quad (4.20)$$

где P_{τ} — сила, действующая вдоль плоскости скалывания; v_{τ} — скорость сдвига; s — площадь плоскости скалывания; ψ — коэффициент, характеризующий долю теплоты, образующейся в результате работы пластической деформации.

Скорость сдвига при прямоугольном резании v_{τ} зависит от угла сдвига φ_0 , переднего угла γ и связана со скоростью резания v известным кинематическим соотношением

$$v_{\tau} = v \frac{\cos \gamma}{\cos(\varphi_0 - \gamma)}. \quad (4.21)$$

В результате подстановки в формулу (4.19) величины $q_{\tau}(t)$, согласно соотношению (4.20), с учетом зависимостей (4.5), (4.6), (4.8)–(4.10) для силы P_{τ} (см. подразд. 4.2.1) и выражения (4.21) для скорости сдвига v_{τ} , после преобразований получим уравнение, характеризующее изменение температуры в плоскости скалывания:

$$\Theta(t) = \frac{\Psi k_a(\xi) V_b v \sin(\varphi_0 + \beta) \cos \gamma}{4 \sqrt{\pi c_p \rho \lambda} \cos(\varphi_0 - \gamma)} \times \\ \times \int_0^t \operatorname{Erfc} \left[\frac{\xi(t') - m_{\xi}}{\sqrt{2} \sigma_{\xi}} \right] \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi_0 + \beta)}{[\xi(t') + 1]^2}} \frac{\sigma(t') dt'}{\sqrt{t - t'}}, \quad (4.22)$$

где V_b — объемная доля волокон; $k_a(\xi)$ — доля волокон, сохраняющих адгезионную связь с матрицей при текущем значении относительной линейной деформации ξ ; m_{ξ} и σ_{ξ} — соответственно математическое ожидание и среднее квадра-

тическое отклонение относительного удлинения ξ_v волокна в момент разрушения, которое рассматривается как случайная функция с нормальным законом распределения; $\text{Erfc } x$ — дополнительный интеграл вероятностей (табличная функция); β — угол, определяющий положение волокон относительно линии среза (см. рис. 4.6).

В соответствии с уравнением (4.22) формула (4.18) для вычисления напряжений в волокнах при их деформировании в процессе смещения элемента стружки вдоль плоскости скалывания имеет вид

$$\sigma(t) = A\xi^m(t) - \frac{B\Psi k_a(\xi)V_v \sin(\varphi_0 + \beta) \cos \gamma}{4\sqrt{\pi c_p \rho \lambda} \cos(\varphi_0 - \gamma)} \times \\ \times \int_0^t \text{Erfc} \left[\frac{\xi(t') - m_\xi}{\sqrt{2}\sigma_\xi} \right] \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi_0 + \beta)}{[\xi(t') + 1]^2}} \frac{\sigma(t') dt'}{\sqrt{t - t'}}. \quad (4.23)$$

Таким образом, для определения максимального значения главной составляющей P_z силы резания может быть использована аналитическая зависимость (4.11), представленная в виде

$$P_z = 0,5\sigma V_v ab k_a(\xi) \text{Erfc} \left[\frac{\xi(t) - m_\xi}{\sqrt{2}\sigma_\xi} \right] \times \\ \times \frac{\sin(\varphi_0 + \beta) \cos \omega}{\sin \varphi_0 \cos(\varphi_0 + \omega)} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi_0 + \beta)}{[\xi(t) + 1]^2}}, \quad (4.24)$$

где текущее значение напряжения «работающих» волокон σ определяется в соответствии с интегральным уравнением (4.23). В зависимости (4.24) через ω обозначен угол действия при резании; a , b — соответственно толщина и ширина срезаемого слоя.

В выражении (4.24) не учитывается сила смятия P_c в месте контакта материала с передней поверхностью и сила тре-

ния P_z на задней поверхности инструмента, поскольку на стадии сдвига элемента стружки силы P_c и P_z малы по сравнению с сопротивлением деформированию волокон в плоскости скалывания.

Отметим, что вычисление функции $\sigma(t)$ по формуле (4.23) вызывает значительные трудности. В связи с этим большой практический интерес представляют менее сложные способы приближенного аналитического определения степени влияния температуры на силу резания.

Температура в зоне стружкообразования непосредственно связана со скоростью резания v . На рис. 4.7 приведена экспериментальная зависимость I изменения главной составляющей силы резания P_z от скорости резания v при точении образцов из органопластика «Вискоза-77». Из рисунка ясно, что увеличение скорости до 5 м/с и соответствующее повышение температуры резания приводят к уменьшению силы резания примерно на 19 % по сравнению с точением при малых скоростях (около 0,07 м/с). Отмеченное изменение силы наблюдается лишь при скорости резания более 0,5...0,7 м/с.

В то же время для применяемого на практике при точении органопластика диапазона скоростей резания (1,3...2,5 м/с) главная составляющая P_z силы резания изменяется несущественно. Это значит, что при $v > 0,7$ м/с степень влияния на условия резания температурного фактора остается практически постоянной. В этом случае в зоне резания достигаются условия теплонасыщения, близкие к предельным, когда вся теплота, выделившаяся в результате пластического деформирования волокон, идет на повышение их температуры. Подобная схематизация процесса стружкообразования соответствует наиболее сильному влиянию температур, вызванных процессами деформации в зоне стружкообразования, на механические свойства обрабатываемого материала и отражает малую теплопроводность органопластиков.

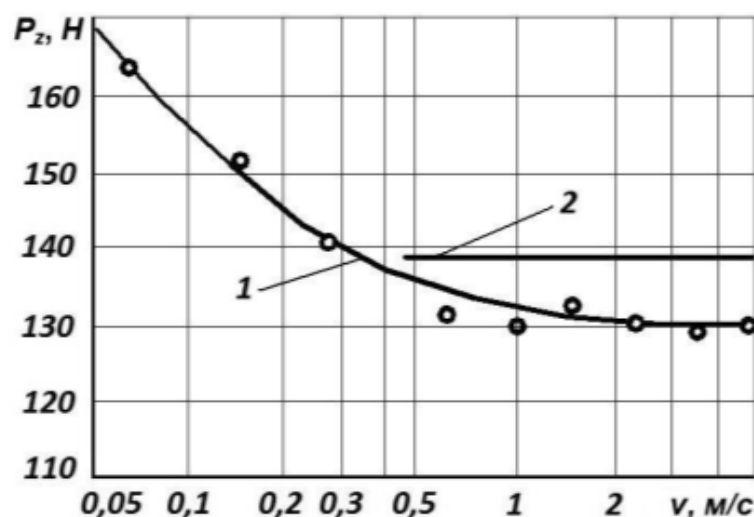


Рис. 4.7. Зависимость составляющей P_z силы резания от скорости резания v :

1 — экспериментальная зависимость (материал образца — органопластик на основе волокна «Вискоза-77», полученный нитевой намоткой; резец Р6М5: $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 20^\circ$, $\alpha_1 = 7^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, $\varphi_1 = 5^\circ$, $r = 0,5$ мм; подача $S_0 = 0,17$ мм/об; глубина резания $t = 2$ мм); 2 — расчетное значение P_z

При принятом допущении сопротивление деформированию не зависит от особенностей развития процесса во времени, поэтому уравнение (4.13) можно представить как

$$\frac{d\sigma}{d\xi} = \frac{\partial\sigma}{\partial\xi} + \frac{\partial\sigma}{\partial\Theta} \frac{\partial\Theta}{\partial\xi}. \quad (4.25)$$

Удельную механическую работу, затрачиваемую на пластическое деформирование волокон, вычисляют по формуле

$$W = \int_0^{\xi} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Соответствующее повышение температуры волокон, вызванное работой W , составляет

$$\Theta(\xi) = \frac{\Psi}{c_p \rho} \int_0^{\xi} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (4.26)$$

Подставляя в уравнение (4.25) частные производные (4.16) и (4.17), а также выражение (4.26) для температуры $\Theta(\xi)$, получаем дифференциальное уравнение, общее решение которого имеет вид

$$\sigma_{\Theta} = \exp\left(-\frac{B\Psi}{c_p\rho}\right) \left[c_1 + mA \int_0^{\xi} \varepsilon^{m-1} \exp\left(\frac{B\Psi}{c_p\rho} \varepsilon\right) d\varepsilon \right],$$

где c_1 — произвольная постоянная.

В подынтегральном выражении показательную функцию $\exp(B\Psi\varepsilon/c_p\rho)$ можно представить степенным рядом. В результате после почленного интегрирования и преобразований, выполненных с учетом начального условия ($\xi = 0$, $\sigma = 0$), находим

$$\sigma_{\Theta} = mA\xi^m \exp\left[-\frac{B\Psi}{c_p\rho}\xi\right] \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{B\Psi}{c_p\rho}\right)^k \frac{\xi^k}{(m+k)k!},$$

$$k = 0, 1, 2, \dots \quad (4.27)$$

Заменив в формуле (4.24) напряжение σ (при статическом нагружении $\sigma = A\xi^m$) функцией σ_{Θ} из зависимости (4.27), описывающей напряженное состояние волокон на различных стадиях деформирования при воздействии температуры, получим расчетную зависимость для определения силы $P_{z\Theta}$ при высоких скоростях резания (для органопластиков $v > 0,7$ м/с):

$$P_{z\Theta} = \frac{1}{2} mA\xi^m \exp\left(-\frac{B\Psi}{c_p\rho}\xi\right) V_b abk_a(\xi) \operatorname{Erfc}\left(\frac{\xi - m_{\xi}}{\sqrt{2}\sigma_{\xi}}\right) \times$$

$$\times \frac{\sin(\varphi_0 + \beta) \cos \omega}{\sin \varphi_0 \cos(\varphi_0 + \omega)} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varphi_0 + \beta)}{(\xi + 1)^2}} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{B\Psi}{c_p\rho}\right)^k \frac{\xi^k}{(m+k)k!}. \quad (4.28)$$

При теоретической оценке степени влияния температуры на силу резания приведенные выше расчетные зависимости для P_z можно представить, согласно (4.24) и (4.28), в виде отношения

$$\frac{P_{z\Theta}}{P_z} = \frac{\sin(\varphi_0 + \beta) \cos(\varphi_{01} + \omega_1) \sin \varphi_{01} \cos \omega}{\sin(\varphi_{01} + \beta) \cos(\varphi_0 + \omega) \sin \varphi_0 \cos \omega_1} \times \\ \times \sqrt{\frac{(m_\xi + 1)^2 - \sin^2(\varphi_0 + \beta)}{(m_\xi + 1)^2 - \sin^2(\varphi_{01} + \beta)}} m \exp\left(-\frac{B\Psi}{c_p \rho} m_\xi\right) \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{B\Psi}{c_p \rho}\right)^k \frac{m_\xi^k}{(m+k)k!}, \quad (4.29)$$

где P_z , φ_{01} , ω_1 — соответственно главная составляющая силы резания, угол сдвига и угол действия при малых скоростях резания, для которых влияние температуры на процесс стружкообразования становится несущественным.

Для изделий, образованных кольцевой намоткой, формулу (4.29) записывают как

$$\frac{P_{z\Theta}}{P_z} = \frac{\sin \varphi_{01} (1 - \operatorname{tg} \varphi_{01} \operatorname{tg} \omega_1)}{\sin \varphi_0 (1 - \operatorname{tg} \varphi_0 \operatorname{tg} \omega)} \sqrt{\frac{(m_\xi + 1)^2 - \cos^2 \varphi_0}{(m_\xi + 1)^2 - \cos^2 \varphi_{01}}} \times \\ \times m \exp\left(-\frac{B\Psi}{c_p \rho} m_\xi\right) \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{B\Psi}{c_p \rho}\right)^k \frac{m_\xi^k}{(m+k)k!}. \quad (4.30)$$

В качестве примера применения приведенных зависимостей был выполнен аналитический расчет по формуле (4.30) соотношения сил $P_{z\Theta}/P_z$ с учетом условий течения, при которых получена экспериментальная зависимость $P_z(v)$, представленная на рис. 4.7. Для рассматриваемого процесса обработки при вычислениях принимали: $\varphi_0 = 38^\circ 30'$; $\varphi_{01} = 35^\circ$; $\omega = \omega_1 = 22^\circ$; $m_\xi = 0,044$; $m = 1$; $\psi = 1$; $B = 14,2 \cdot 10^6$ Н/(м²·град);

$c_p = 1400$ Дж/(кг·град); $\rho = 1320$ кг/м³. В этом случае, согласно (4.30), $P_{z\Theta} / P_z = 0,86$. Полученное значение $P_{z\Theta} / P_z$ показано на рис. 4.7 в виде прямой 2, представляющей расчетное значение силы резания с учетом воздействия температуры по отношению к экспериментальному значению силы P_z при малой скорости резания (0,07 м/с).

На рис. 4.7 видно, что при $v > 0,7$ м/с теоретическое значение главной составляющей $P_{z\Theta}$ силы резания удовлетворительно совпадает со значением, полученным экспериментально. В связи с этим приведенные аналитические зависимости можно использовать на практике для оценки влияния температуры на силу резания при обработке КМ на основе органоволокон.

4.3. Перспективные методы исследования физики резания полимерных композиционных материалов

4.3.1. Новое направление в экспериментальных исследованиях термомеханики резания полимерных композиционных материалов

Основным средством экспериментального исследования силовых факторов при резании является применение различных конструкций динамометрической аппаратуры, отличающейся функциональными возможностями (одно-, двух- и трехкомпонентные динамометры, различная чувствительность к нагрузке и др.) и принципом действия (упруго-механические, гидравлические и упругоэлектрические динамометры). Вместе с тем свойства отдельных разновидностей современных КМ позволяют разработать новые подходы к изучению физико-механических условий их формообразования на разных этапах изготовления изделий, создать более совершенные методы диагностики и испытания конструкций.

В настоящее время для изделий аэрокосмической техники разрабатывают КМ нового поколения, получившие название интеллектуальных. Чтобы дать характеристику уникальных

функциональных возможностей таких материалов, в технической литературе используют термины «сенсорные», «активные», «управляемые», «адаптивные», «самонастраивающиеся», «разумные». Уникальность функциональных возможностей КМ достигается синтезом КМ и внедряемых в их структуру сенсоров и активаторов в сочетании с системами логического управления и электронными аппаратными средствами (рис. 4.8). Материал с сенсорными элементами приобретает возможность распознавания возникшей ситуации (сенсорная функция), преобразует деформацию или перемещение (скорость или ускорение, угол поворота или скорость угла поворота и т. п.), вызванные внешним термомеханическим воздействием, в электрический выходной сигнал. Одно из современных направлений проектирования активных КМ, обладающих возможностью распознавания ситуации, связано с использованием пьезосенсоров на основе керамических композитных волокон, которые встраиваются в полимерную матрицу.

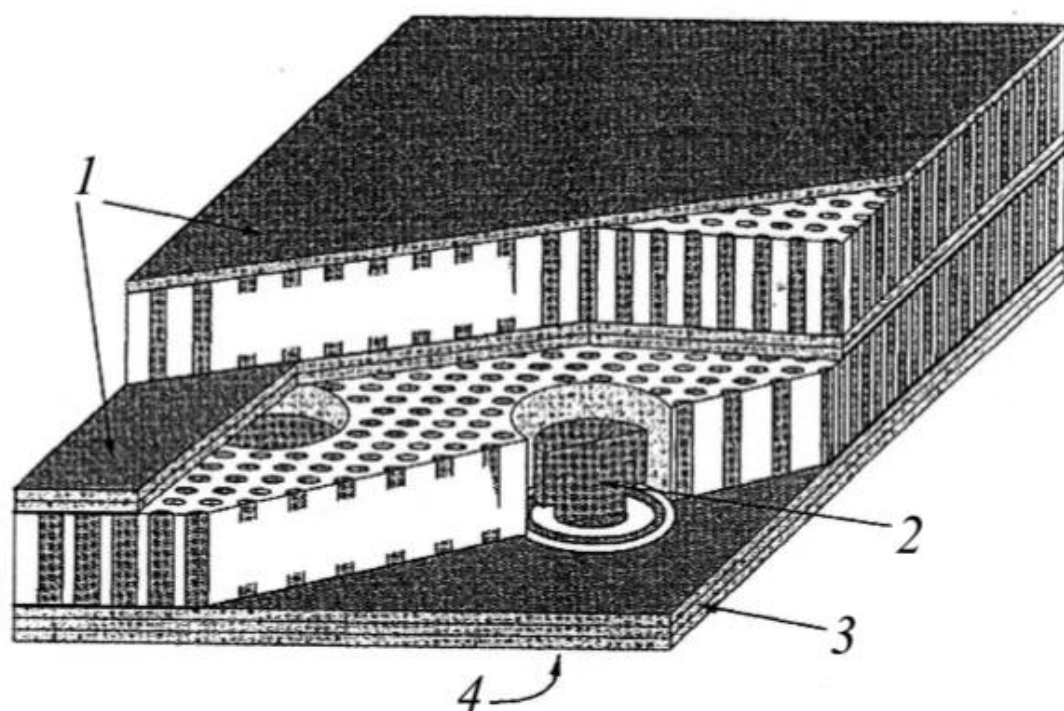


Рис. 4.8. Двухслойная панель в разрезе — сенсорный слой расположен в непосредственной близости к управляемой поверхности: 1 — пластины из стеклопластика; 2 — акселерометры; 3 — многослойный стеклопластик; 4 — управляемая поверхность

Использование сенсорной функции интеллектуальных КМ в практике экспериментального изучения технологий формообразования заготовок и их механической обработки позволяет создать качественно новые методы и средства опытного исследования физических и механических процессов и явлений при изготовлении изделий из КМ. Так, встроенные в КМ сенсорные элементы дают возможность с помощью информационно-вычислительной системы фиксировать поля деформаций и перемещений, вызванные силовыми факторами или тепловыми явлениями.

В результате при исследовании различных операций технологии изготовления изделий из КМ могут определяться напряженно-деформированное состояние материала в зоне обработки и конструкции в целом, влияние на напряженно-деформированное состояние эффекта термоупругости, возникающего вследствие технологических температур. Непрерывная регистрация состояния конструкции позволяет выявить динамические эффекты в процессе обработки, раскрыть кинетику формирования поля остаточных напряжений, установить интенсивность протекания реологических процессов (релаксации напряжений, ползучести), которые со временем приводят к изменению формы и относительного положения обработанных поверхностей, влияют на точность изготовления и сборки изделий, особенно при производстве крупногабаритных корпусных конструкций.

Такой подход позволяет обнаруживать кинетику возникновения внутренних дефектов в материале на разных этапах изготовления конструкции, изучать причины и критические условия возникновения и развития их во времени, прогнозировать надежность функционирования изделия в процессе его эксплуатации, наметить пути наиболее рационального устранения возникших или накопившихся повреждений.

Управление внутренними полями напряжений и деформаций в процессе обработки с помощью встроенных в структуру интеллектуальных КМ активаторов дает возможность

частично подавлять неблагоприятные явления и осуществлять оптимизацию условий обработки.

Таким образом, разработанные интеллектуальные КМ открывают новые возможности для изучения технологий их формообразования и управления условиями их изготовления. Для углубленного исследования традиционных КМ при необходимости по уже разработанным технологиям могут создаваться опытные образцы этих материалов, наделенные сенсорными свойствами.

4.3.2. Методы экспериментального определения температуры в зоне резания

Физические свойства ПКМ, и в первую очередь отсутствие электропроводности, обуславливают особые требования к экспериментальному определению температуры в зоне резания. Наиболее широко применяемые при резании металлов методы естественной, полуюскусственной термопары или двух резцов становятся в этом случае непригодными. Методы, основанные на применении люминесцентных термоиндикаторов, регистрации температурного поля по тепловому излучению поверхности и с помощью пленочных термометров сопротивления признаны неэффективными. Косвенные методы измерения (калориметрический, микроструктурного анализа, сравнения обработанных поверхностей, использование термокрасок, легкоплавких веществ и др.) при обработке ПКМ применимы только для грубой оценки температуры в зоне резания.

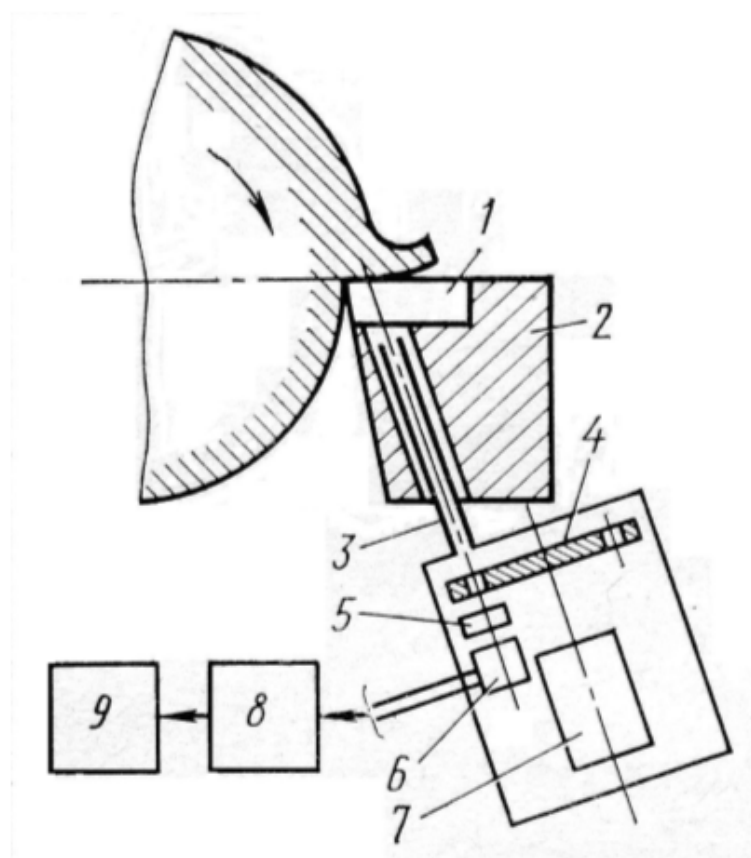
В настоящее время для измерения температуры в зоне резания рекомендуют использовать методы разрезного резца, бегущих термопар, подведенной искусственной термопары, заземленной термопары, встроенных электродов.

Для изучения тепловых явлений и контактных процессов на стыках трения передней и задней поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом можно эффективно

применять метод фотоэлектрической пирометрии (рис. 4.9). В этом случае режущий инструмент оснащают пластиной, выполненной из пропускающего инфракрасное излучение материала (например, алмаза или отожженного корунда). В державке выполняют отверстие, ось которого проходит через площадку контакта инструмента со стружкой, в отверстии размещают светопровод. Тепловое излучение от контактного участка зоны резания по светопроводу через диафрагму и светофильтр поступает на фотоприемник. Электрический сигнал с фотоприемника передается на усилитель и далее на регистрирующий прибор. По сигналам последнего судят о температуре контролируемого участка зоны резания, инфракрасное излучение которого было зафиксировано фотоприемником измерительного устройства.

Рис. 4.9. Схема бесконтактного устройства для измерения температуры при точении:

1 — пластина из прозрачного для инфракрасных лучей материала; 2 — державка с отверстием; 3 — светопровод; 4 — модулятор; 5 — светофильтр; 6 — приемник излучения; 7 — микродвигатель; 8 — усилитель; 9 — регистрирующий прибор



В МГТУ им. Н.Э. Баумана фотоэлектрический метод применяли для изучения температуры в зоне резания и тепловых полей, возникающих при выполнении операции токарной обработки органопластиков. В качестве инструмента использо-

вали цельный прозрачный резец из кристалла лейкосапфира (сечение 11×11 мм, длина 80 мм) — рис. 4.10.

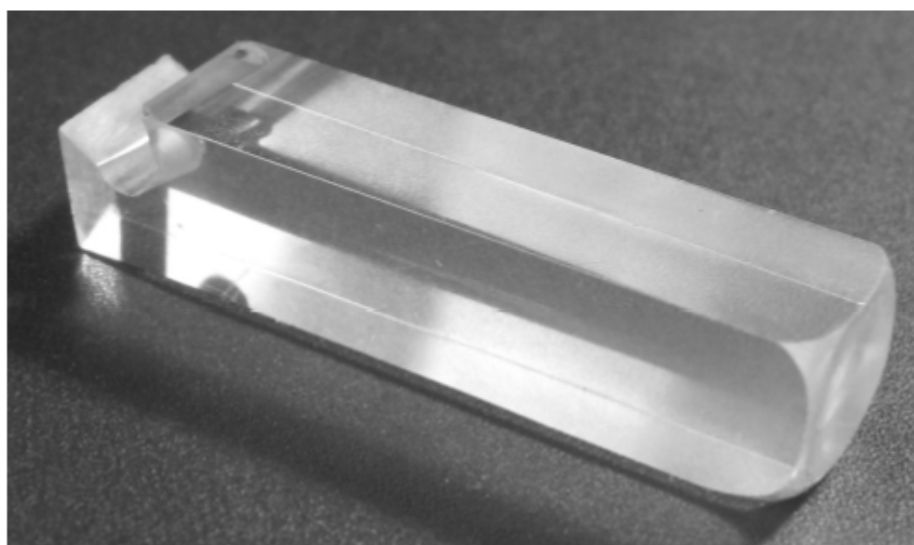


Рис. 4.10. Резец из монокристалла лейкосапфира для измерения температуры на контактных поверхностях инструмента фотоэлектрическим методом

Сущность метода заключается в следующем. Фотоэлектрический датчик с помощью оптической системы фокусируют непосредственно через тело резца на исследуемом участке контактной поверхности в зоне резания (рис. 4.11). Сигнал через усилитель поступает на регистрирующий стрелочный миллиамперметр. Для перевода показаний прибора в температуру используют градуировочную зависимость.

В приборе для измерения температуры в качестве датчика выбран сернисто-свинцовый фоторезистор, сопротивление которого зависит от энергии теплового излучения зоны резания. Фоторезистор снабжен светофильтром. Максимум чувствительности фоторезистора лежит в диапазоне длин волн, излучаемых при резании органопластиков.

Фотоэлектрический метод определения температур можно использовать как средство активного контроля, он дает возможность управлять операционными технологиями обработки резанием, обеспечивать оптимизацию процесса по температурному параметру.

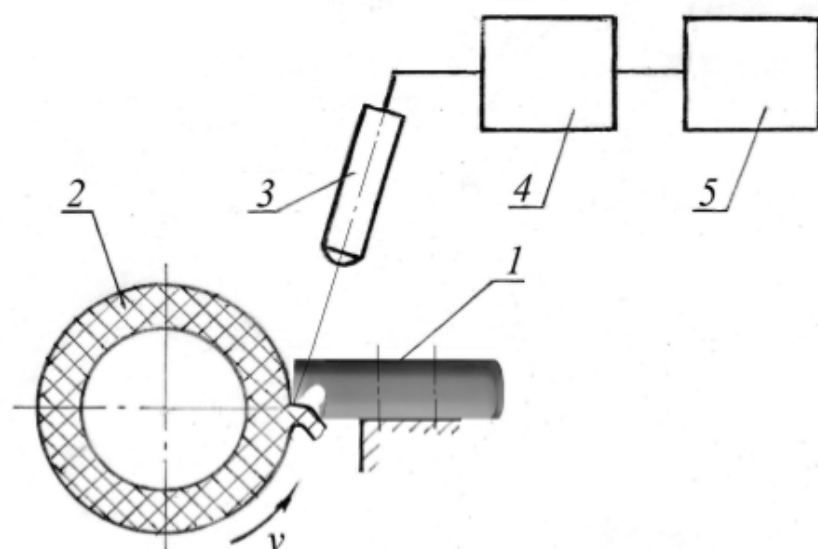


Рис. 4.11. Схема измерения температуры фотоэлектрическим методом:

1 — резец из прозрачного материала; 2 — заготовка; 3 — датчик; 4 — усилитель электрического сигнала; 5 — регистрирующий прибор

4.3.3. Особенности оценки качества изделий из полимерных композиционных материалов

Применяемые в машиностроении нормативные материалы по оценке качества продукции из металлов используют в настоящее время и при изготовлении изделий из КМ. Одним из важнейших показателей качества поверхностей изделий машиностроения является шероховатость поверхностей. Отклонения микро- и макрогеометрии поверхностей регламентированы ГОСТ 2789 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики». В этом ГОСТе установлено, что стандарт не распространяется на шероховатость ворсистых поверхностей.

Вместе с тем обработка резанием ПКМ, армированных непрерывными или рубленными волокнами, может сопровождаться образованием ворса на обработанных поверхностях вследствие перерезания волокон режущими лезвиями инструмента. Особенно высокая склонность к образованию ворса проявляется при различных технологических способах

обработки резанием органопластиков — ПКМ, армированных органоволокнами. При изготовлении изделий из волокнистых материалов в ряде случаев требуется количественная оценка показателей, связанных с ворсистой поверхностью, от которых зависит возможность или недопустимость эксплуатации изготовленного изделия.

В качестве одной из количественных характеристик ворсистости в МГТУ им. Н.Э. Баумана был предложен относительный параметр, названный коэффициентом ворсистости K_v . Он равен отношению площади поверхности, покрытой ворсом, к площади всей обработанной поверхности. Коэффициент K_v вошел в отраслевой стандарт и используется в промышленности.

Однако при решении практических задач обеспечения и оценки качества изделий из волокнистых ПКМ требуется введение комплекса параметров, более полно характеризующих состояние и свойства покрытой ворсом поверхности, например: высота ворса, плотность покрытия, удельная жесткость покрытия, число перерезанных нитей (жгутов) на единицу площади обработанной поверхности, характер (вид) ворса, наличие микро- и макроотслоений материала в местах образования ворса и др.

Тенденция к расширению использования ПКМ вызывает необходимость разработки номенклатуры параметров для количественной оценки качества ворсистых поверхностей. Стандартизация и нормирование числовых значений этих параметров (допускаемые отклонения в зависимости от требований к конструкции) помогут обеспечить надежность изделий, изготовленных из волокнистых ПКМ.

Специфическим показателем качества обработанной поверхности при резании ПКМ является отсутствие заметных следов термомеханической деструкции материала, которую относят к недопустимым дефектам изделия. Для определения рациональных режимов резания, исключающих явление де-

струкции, в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана специальная фотометрическая установка.

Оптические свойства поверхности материала, подвергшейся термомеханической деструкции (появление прижогов, образование коксового слоя связующего), изменяются. Сущность используемого в фотометрической установке (рис. 4.12) оптического метода заключается в измерении отраженного от поверхности изделия светового потока, изменение которого несет информацию о степени деструкции материала. Количественно степень деструкции определяют по тарировочному графику, связывающему результаты фотометрирования специальных образцов с величиной деструкции, определяемой термогравиметрическим методом (изменение массы эталонного образца).

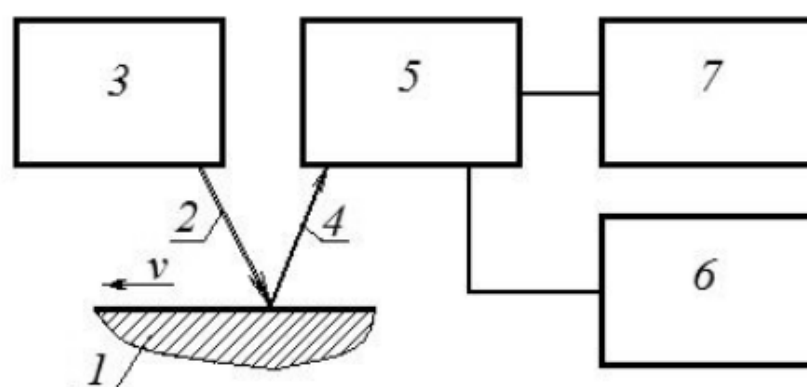


Рис. 4.12. Структурная схема фотометрической установки для регистрации степени термомеханической деструкции обрабатываемого материала:

1 — участок контролируемой поверхности изделия; 2 — зондирующий световой поток; 3 — осветительный прибор; 4 — отраженная часть светового потока; 5 — фотоумножитель; 6 — выпрямитель; 7 — регистрирующий прибор

Принцип действия фотометрической установки заключается в следующем: луч света от осветительного прибора

направляется на контролируемый участок поверхности изделия; отраженная часть светового потока по световоду поступает на фотоумножитель, где преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный силе света отраженного светового потока; регистрация сигналов производится с помощью осциллографа или цифрового микроамперметра.

Разработанную установку используют при отработке режимов резания заготовок изделий из ПКМ; ее также можно применять в системах активного контроля процесса обработки и автоматического управления этим процессом для экспресс-диагностики состояния поверхностного слоя обрабатываемых изделий.

Контрольные вопросы

1. Какие основные стадии присущи процессу стружкообразования при резании ПКМ?
2. Какие дефекты обработанной поверхности характерны для обработки резанием ПКМ?
3. В чем состоит физический механизм образования ворса на обработанной поверхности?
4. Как связана относительная линейная деформация отдельных волокон наполнителя с их расположением относительно плоскости среза?
5. От каких физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов зависит сила резания?
6. Как влияет температура резания на силовые факторы при обработке ПКМ?
7. Как учитывается влияние температуры на силу резания?
8. Какие КМ называют интеллектуальными? На основе чего достигаются «разумные» свойства создаваемых КМ?
9. Как можно использовать сенсорную функцию интеллектуальных материалов для экспериментального изучения технологий формообразования КМ?

10. Как может осуществляться управление процессом изготовления изделий из интеллектуальных материалов?
11. В чем заключается сущность метода фотоэлектрической пирометрии?
12. Каковы возможности метода фотоэлектрической пирометрии при измерении температуры в зоне резания ПКМ?
13. Каковы перспективы использования фотоэлектрического метода в технологиях изготовления изделий из ПКМ?
14. Что определяется коэффициентом ворсистости ПКМ?
15. В чем заключается сущность оптического метода оценки качества обработанной поверхности ПКМ?
16. В чем состоит принцип действия установки для фотометрирования обработанной поверхности?
17. Как используют фотометрическую установку при обработке резанием ПКМ?

5. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полимерные КМ характеризуются специфическими закономерностями протекания процесса резания. Это приводит к необходимости создания и применения нетрадиционных методов и средств обработки, характерных в ряде случаев только для условий резания КМ и обеспечивающих высокое качество обработки и необходимые технико-экономические показатели. Технологические решения, впервые разработанные и использованные в технологиях обработки конструкций из КМ, можно отнести к таким направлениям совершенствования процесса резания, как создание новых методов и способов обработки резанием; разработка новых конструкций режущего инструмента и приспособлений; применение комбинированных энергетических воздействий; целенаправленное создание требуемого энергетического состояния обрабатываемого материала и др.

Подобные разработки, поддерживающие динамичность развития технологии машиностроения, являются одним из главных направлений в решении проблем, касающихся повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции, сокращения сроков ее обновления, снижения материальных затрат, обеспечения максимального соответствия качества продукции индивидуальным требованиям потребителя.

5.1. Высокоэффективные методы и средства обработки полимерных композиционных материалов

5.1.1. Метод широких срезов

Сущность метода широких срезов (МШС) состоит в том, что для удаления припуска с заготовки используют инструмент, имеющий длину режущей кромки 100...300 мм и более и работающий на операции точения с поперечной подачей по тангенциальной или радиальной схеме фасонной обработки.

Этот метод позволяет обрабатывать протяженные части поверхности (рис. 5.1), в отдельных случаях — одновременно все подлежащие формообразованию поверхности изделия, включая наружные, внутренние и торцовые поверхности, состоящие из участков разной конфигурации и точности. Это дает возможность значительно, в 100–200 и более раз, интенсифицировать процесс удаления припуска на обработку, в 10–20 и более раз увеличить производительность труда при выполнении операции механической обработки изделия.

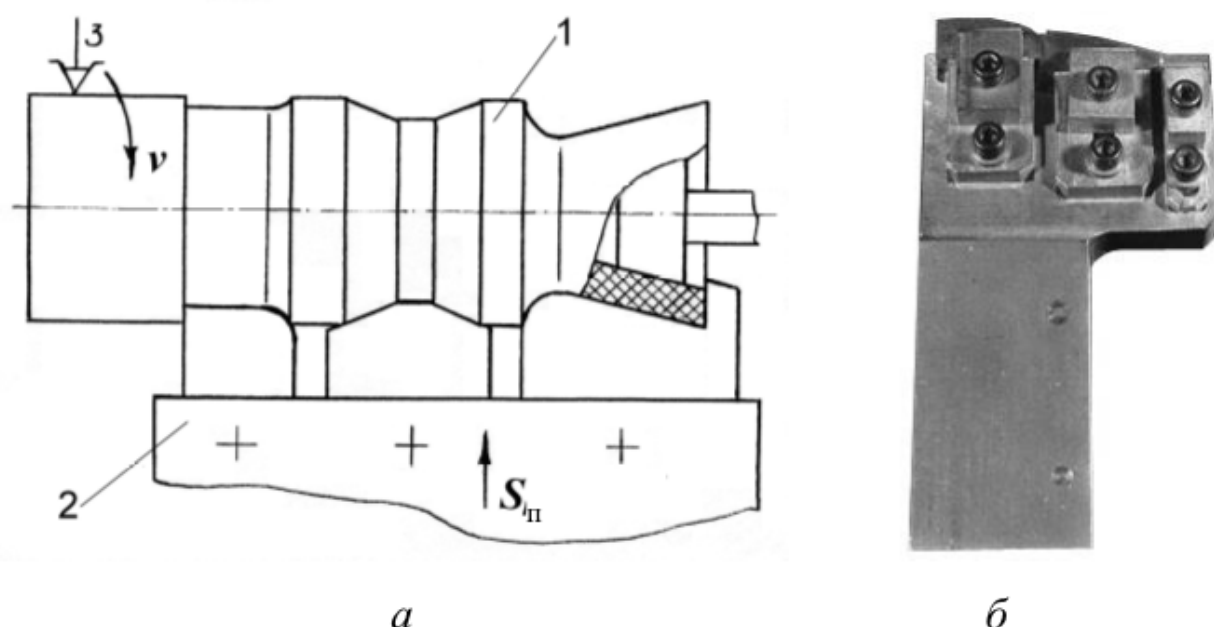


Рис. 5.1. Схема обработки резанием с применением МШС (а) и общий вид широколезвийного резца — резцового блока (б):

1 — заготовка; 2 — резцовый блок; $S_{\text{п}}$ — поперечная подача

Наряду с повышением производительности обработки МШС обеспечивает и высокое качество обработанных поверхностей вследствие того, что при широколезвийной обработке весь профиль изделия получают одновременно главной режущей кромкой инструмента. Этим достигаются малые значения шероховатости поверхности, тогда как при контурном точении поверхностный слой формируется последовательно коротким участком вспомогательной режущей кромки инструмента.

Многократное уменьшение длины пути резания при изготовлении каждой детали (в 100 и более раз) радикально, примерно в соответствующее число раз, увеличивает период стойкости режущего инструмента, что позволяет получать большие партии деталей, мало отличающихся по конфигурации и точности изготовления. Конструкция инструмента обеспечивает сокращение расхода инструментального материала. Таким образом, применение МШС, предназначенного для повышения производительности труда при изготовлении конструкций из ПКМ, способствует получению и других важнейших результирующих показателей обработки.

Метод широких срезов используют для обработки изделий из стекло-, угле- и органопластиков, для которых удельные силы резания (удельное давление резания, МПа; сила, действующая на единицу длины режущей кромки, МН/м) существенно меньше (в 10–60 раз), чем при обработке металлов. Скорость резания в этом случае выбирают на основе рекомендаций для обычной обработки, подачу — исходя из точности обработки с учетом деформаций технологической системы. Применение МШС наиболее эффективно в условиях серийного и массового производства.

При обработке нежестких валов или корпусных деталей во избежание значительных деформаций обрабатываемых поверхностей и вызываемых ими погрешностей обработки рекомендуется уменьшать значение подачи или проводить обработку за несколько рабочих ходов, выделив ряд участков

обрабатываемых поверхностей с различными требованиями к точности обработки.

5.1.2. Высокоскоростная обработка

При обработке ПКМ параметры режима, и в первую очередь скорость резания, назначают из условия отсутствия термоокислительной деструкции материала, что считают одним из обязательных требований обеспечения качества поверхностного слоя изделия. Низкие температуры начала протекания термодеструкции ПКМ (250...350 °С) в сочетании с крайне низкой их теплопроводностью (в 100–600 раз меньше, чем у конструкционных сталей) вызывают необходимость, несмотря на относительно небольшие значения удельного давления на инструмент, назначать на операциях механической обработки малые скорости резания. Это находит отражение в действующих нормативах на режимы резания, в стандартах предприятий и справочных материалах, что существенно ограничивает производительность обработки.

Вместе с тем в области высоких скоростей резания (25...100 м/с и более), соответствующей температурам, значительно (в 2,0–4,5 раза) превышающим критические температуры термодеструкции ПКМ, существует широкий диапазон скоростей обработки, при которых обеспечивается высокое качество поверхностного слоя.

На рис. 5.2 представлены типовые зависимости изменения температуры Θ и меры деструкции D_m КМ в зависимости от скорости резания v . На рисунке видно, что при определенной скорости резания v_{D_m} температура на стыке трения задней поверхности инструмента с обработанной поверхностью достигает критического значения $\Theta_{кр}$, при котором начинает проявляться термодеструкция материала. Дальнейшее повышение температуры с увеличением скорости резания вызывает интенсификацию деструкционных процессов. При определенной скорости резания (правая граница диапазона скоростей, I на

рис. 5.2) достигается критическая мера деструкции материала, при превышении которой обработанную поверхность относят к дефектной. Дальнейшее повышение скорости сопровождается монотонным увеличением температуры. Вместе с тем мера деструкции D_M , достигнув максимума при определенной критической скорости $v_{кр}$, начинает уменьшаться и в диапазоне скоростей резания II не превышает предельного значения $D_{M\text{кр}}$. Такой характер зависимости $D_{M\text{кр}}(v$

) объясняется тем, что с увеличением скорости резания продолжительность контакта задней поверхности инструмента с обработанной поверхностью заготовки уменьшается, т. е. сокращается время воздействия температуры, что приводит к уменьшению величины термодеструкции поверхностного слоя. В результате при достижении критической скорости $v_{кр}$ эффект уменьшения времени контакта инструмента с обработанной поверхностью изделия начинает сказываться сильнее, чем продолжающееся повышение температуры резания, что и позволяет осуществлять процесс резания ПКМ при этих скоростях. Резание при скоростях, значения которых лежат в за- критическом диапазоне II, называют высокоскоростным.

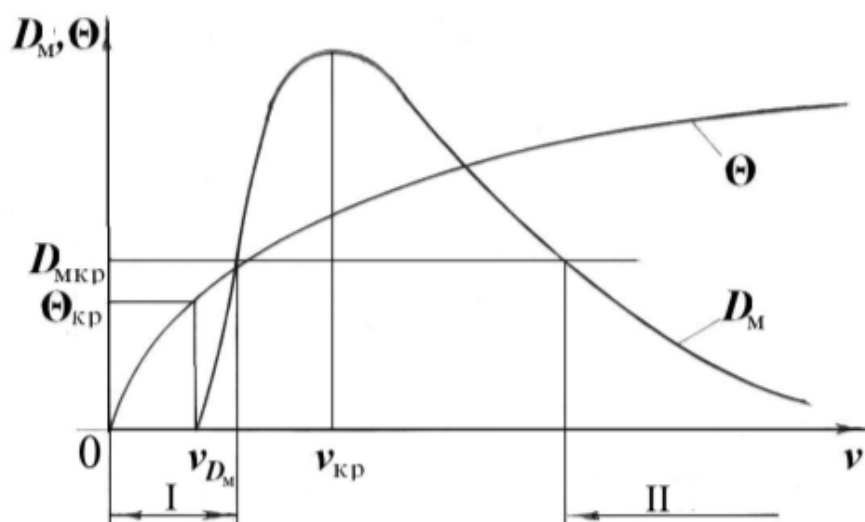


Рис. 5.2. Влияние скорости резания v на среднюю температуру Θ на задней поверхности резца и меру деструкции D_M КМ:

I, II — диапазон значений v при обычном резании и при высокоскоростной обработке

Таким образом, метод высокоскоростной обработки является эффективным средством интенсификации процесса резания ПКМ (в 50–100 и более раз). Применение этого метода может ограничиваться техническими возможностями оборудования, большими габаритами обрабатываемого изделия (инерционными силами) или недостаточной жесткостью заготовки.

5.1.3. Метод резания с предразрушением срезаемого слоя

Сущность метода заключается в целенаправленном изменении энергетического состояния материала срезаемого слоя путем его предварительного деформирования, осуществляемого в процессе резания дополнительным механическим источником энергии. При этом используют разные методы поверхностного пластического деформирования: накатывание цилиндрическим или рифленым роликом (рис. 5.3, а), выглаживание, чеканку, центробежную или ультразвуковую обработку и т. п. Этим достигается частичное разрушение матрицы ПКМ, в объеме материала срезаемого слоя формируется развитая сетка микро- и макротрещин (рис. 5.3, б), вызывающих ухудшение его механических характеристик и, как следствие, уменьшение силы и температуры резания. Метод резания с предразрушением срезаемого слоя позволяет значительно увеличить период стойкости режущего инструмента, особенно при обработке КМ с низкой пластичностью, существенно повысить точность обработки деталей вследствие уменьшения размерного износа инструмента и снижения упругих деформаций технологической системы путем рационального выбора направления приложения воздействия дополнительного деформирующего устройства.

Параметры режима v , S_0 и t назначают в соответствии с рекомендациями для обычного резания ПКМ. Линейную нагрузку q дополнительного воздействия на материал в случае токарной обработки принимают такой, чтобы главная со-

ставляющая P_z силы резания была равна 10...20 % ее значения при обычном резании. Дальнейшее увеличение нагрузки может вызывать ухудшение параметров обработанной поверхности: увеличение шероховатости, волнистости, появление расслоений поверхностного слоя.

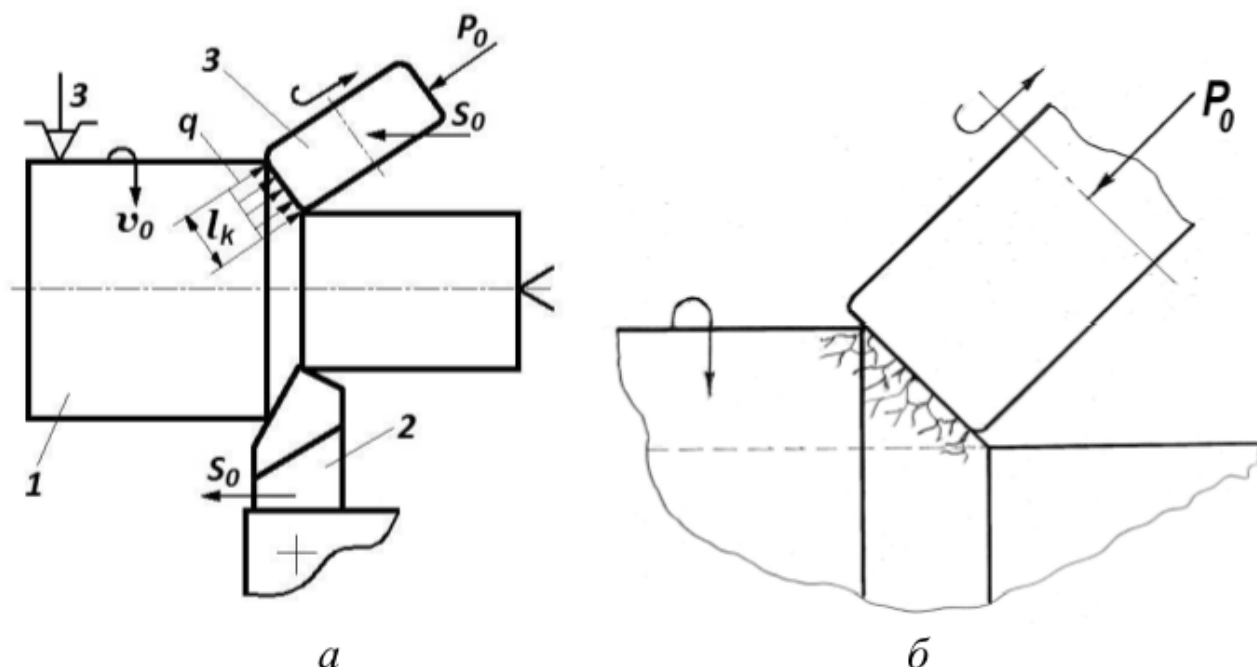


Рис. 5.3. Схема точения с предразрушением материала срезаемого слоя (а) и характер разрушения поверхности резания при воздействии нагружающего устройства (б):

1 — заготовка; 2 — режущий инструмент; 3 — накатной ролик; q — линейная нагрузка дополнительного устройства на срезаемый слой ($q = P_0/l_k$, где P_0 — сила воздействия накатного ролика; l_k — длина контакта рабочего участка ролика и заготовки)

5.1.4. Метод резания с дополнительным технологическим покрытием

Метод предназначен для изготовления изделий из таких волокнистых КМ, при механической обработке которых (лезвийной и, особенно, абразивной) в результате перерезания волокон наполнителя в процессе резания образуется ворс. Высокая склонность к образованию на обработанной

поверхности ворса проявляется при обработке резанием полиармированных гибридных КМ (ГКМ), содержащих волокна, существенно отличающиеся прочностными и упругими свойствами; пространственных многокомпонентных структур КМ (например, 3D-каркас из стеклянных и кварцевых волокон — рис. 5.4, *а*) и, особенно, органопластиков (рис. 5.4, *б*) или композиций, содержащих органические волокна. В отдельных случаях ворсистость поверхности после механической обработки не устраняется ни одним из традиционных методов, включая чистовые и финишные.



а



б

Рис. 5.4. Вид поверхностей волокнистых ПКМ, обработанных обтачиванием:

а — трехмерный пространственный стеклопластик 3К1Ф3, армированный кварцевыми волокнами; *б* — органопластик «Вискоза-77»

Сущность метода резания с дополнительным технологическим покрытием (ДТП) заключается в том, что после обработки поверхности заготовки в окончательный размер образовавшийся ворс связывают нанесением твердеющего технологического покрытия, которое затем удаляют при повторном (чистовом) проходе инструмента в тот же размер (рис. 5.5). Толщину покрытия (0,5...2,0 мм) выбирают, учитывая высоту ворса. В качестве покрытия используют различные типы связующего, применяемого при изготовлении

ПКМ, или быстротвердеющие клеи и лаки, имеющие химическое сродство с основным материалом. Технологическое покрытие заполняет неровности обрабатываемой поверхности заготовки и после полимеризации обеспечивает хорошую адгезию с материалом заготовки и отдельных перерезанных волокон со связующим. При последующем удалении технологического покрытия режущим инструментом срезается и ворс, прочно удерживаемый связующим.

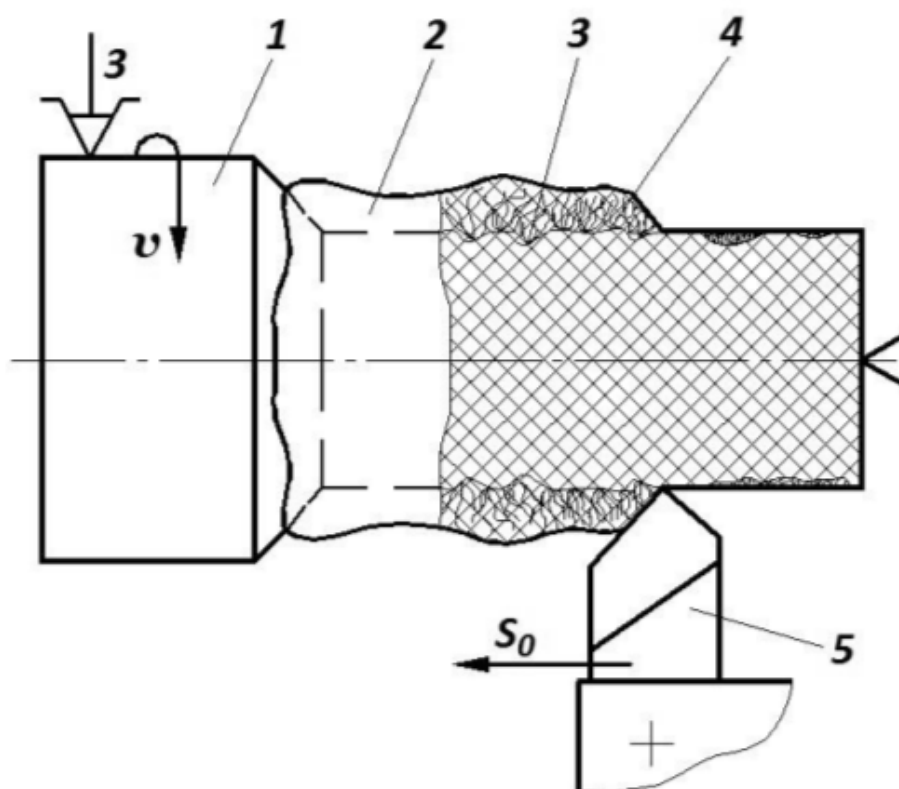


Рис. 5.5. Схема точения ПКМ методом резания с ДТП (чистовой проход):

1 — заготовка; 2 — технологическое покрытие; 3 — профиль обработанной поверхности после первого (предварительного) прохода инструмента; 4 — ворс, образовавшийся на поверхности после первого прохода; 5 — инструмент

Метод резания с ДТП нашел применение при решении производственных задач, связанных с повышением качества обработанных поверхностей изделий из волокнистых ПКМ. Его эффективно используют при выполнении операций точения, растачивания, фрезерования, сверления, зенкерования,

развертывания, зенкования цилиндрических и конических отверстий под головки болтов, винтов и заклепок, резьбонарезания и ряде других. При выполнении всех указанных видов работ метод резания с ДТП позволяет, если необходимо, обеспечить практически полное удаление ворса с обработанных поверхностей заготовок.

Применение метода резания с ДТП при чистовой обработке волокнистых ПКМ дает возможность уменьшить шероховатость в 2 раза и более при выполнении операций растачивания и подрезания торцовых поверхностей, почти в 2 раза при рассверливании и более чем в 7 раз при развертывании отверстий в органопластике спиральной намотки.

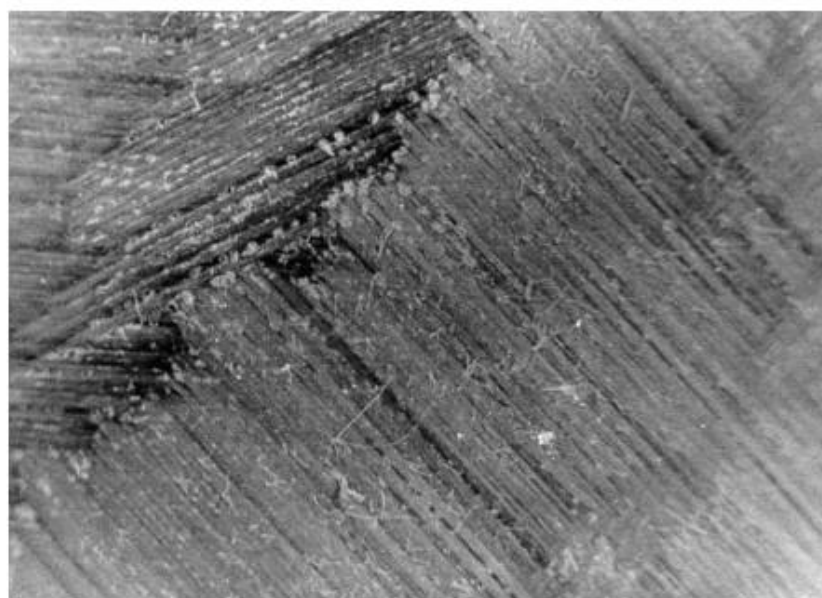


Рис. 5.6. Вид поверхности изделия из органопластика после обработки методом резания с ДТП

Механическая обработка полимеризованного покрытия на режимах тонкого точения позволяет получить шероховатость поверхности деталей из органопластика $Ra = 0,5 \dots 1,25$ мкм, отклонение от круглости 3-й, 4-й степеней точности, высокую точность размеров (6-го, 7-го квалитетов), практически полностью исключить ворсистость обработанной поверхности (рис. 5.6), что не обеспечивается другими известными

методами обработки. Режимы резания ПКМ и технологического покрытия в этом случае назначают в соответствии с рекомендациями по обработке указанных материалов в обычных условиях.

Основным недостатком метода резания с ДТП является низкая операционная производительность, вызванная потерями времени (примерно 0,5...12,0 ч в зависимости от типа покрытия) на процесс полимеризации или затвердевания дополнительного покрытия перед окончательным проходом инструмента. При применении в качестве дополнительного покрытия эпоксидного связующего, например ЭДТ-10, время отверждения (9...12 ч в холодном состоянии) можно существенно сократить искусственным подогревом поверхности (до 40 мин при температуре 120 °С), использованием СВЧ-нагрева или радиоактивного облучения.

5.1.5. Метод резания с технологическим наполнителем

Метод предназначен для обработки материалов и изделий с очень малой жесткостью и (или) прочностью. Это КМ с высокой пористостью, конструкции сетчатой или ячеистой структуры, тонкостенные корпусные детали, цилиндры, кольца, втулки, полимерные сотовые заполнители и т. п., процесс формообразования которых методами лезвийной и абразивной обработки в их естественном состоянии вызывает значительные трудности, а в отдельных случаях практически невозможен.

Сущность метода резания с технологическим наполнителем заключается в увеличении жесткости и прочности конструкции заготовки в результате ее заполнения или пропитки жидкой технологической средой с последующими отверждением и механической обработкой. После завершения механической обработки технологический наполнитель удаляют. В качестве такого наполнителя могут быть использованы парафин, сплав Вуда, некоторые виды пластмасс, вода, переводя-

мая в лед, и другие составы, которые после выполнения необходимых видов лезвийной обработки легко удаляются и не вызывают технологических трудностей для качественного выполнения всех последующих операций.

Этот метод может применяться при обработке любых КМ и при выполнении всевозможных видов обработки резанием. Выбор технологической среды в качестве наполнителя определяется конкретной технологической задачей.

5.1.6. Методы терморезания

Одним из путей технологического решения проблемы повышения качества обработки, и в том числе устранения ворса на обработанной поверхности изделия, является применение методов терморезания.

К терморезанию относят методы обработки, основанные на управлении тепловыми потоками для улучшения обрабатываемости материала заготовки. Эффект от применения методов терморезания достигается как при уменьшении температуры, так и при интенсификации термического режима механической обработки ПКМ.

Известно, что понижение температуры материала вызывает уменьшение его пластичности и может приводить к охрупчиванию. Так, при обработке резанием органопластиков при температуре жидкого азота (77 К) повышается качество изделий — уменьшается шероховатость и ворсистость поверхности. Вместе с тем охлаждение обрабатываемого материала до криогенных температур устранить ворс полностью не позволяет.

Применение дополнительного нагрева материала заготовки может в отдельных случаях обеспечивать наряду с улучшением качества обработки увеличение производительности процесса резания и периода стойкости инструмента. Эффект от воздействия дополнительно подведенной энергии зависит от большого числа факторов: режима резания, мощности источника нагрева, характера распределения энергии и концен-

трации ее в зоне нагрева, положения пятна нагрева относительно зоны обработки, формы и размеров заготовки и инструмента, их теплофизических свойств и др.

Неоптимальные условия подвода энергии, как правило, приводят к ухудшению результатов обработки или ее отдельных показателей по сравнению с обычным резанием.

5.1.7. Метод термомеханической обработки

Метод применяют для повышения качества обработки волокнистых ПКМ, склонных к образованию ворса в процессе резания. Сущность метода заключается в формировании макро- и микрогеометрии поверхности, а также структуры материала поверхностного слоя изделия, прошедшего предварительную обработку резанием, путем комбинированного последовательного или одновременного теплового и механического воздействия.

Комбинированное энергетическое воздействие на материал способствует уменьшению шероховатости поверхности и устранению образующегося ворса. Технологические параметры такого термомеханического нагружения определяются природой связующего вещества. Так, при использовании в качестве связующего отвержденной эпоксидной смолы наиболее рациональными значениями температуры кратковременного теплового воздействия являются значения 200...300 °С, при которых происходит лишь размягчение связующего без заметного изменения его структуры в результате термодеструкции. Давление специального механического устройства на вязкий поверхностный слой ПКМ обеспечивает прочную связь ворса, образовавшегося при предшествующей обработке, с застывшим связующим веществом и формирует поверхность изделия. Вращательное и (или) поступательное перемещение такого устройства способствует равномерному распределению размягченного (псевдожидкого) связующего по всей обработанной поверхности, впрессовыванию в связу-

ющее вещество выступающего ворса. В зоне подвижного контакта развивается динамический процесс перестройки структуры материала (образование «третьего тела»).

Формирование поверхностного слоя изделия в условиях повышенных температур и механического воздействия способствует уменьшению упругого последействия материала (например, при обработке отверстия уменьшается усадка диаметра его канала). Определенное сочетание значений температуры, давления и длительности их приложения позволяет практически полностью исключить усадку и одновременно обеспечить высокое качество обработанной поверхности.

Метод термомеханической обработки может использоваться при выполнении многих операционных технологических процессов: точения, фрезерования, сверления, зенкерования, развертывания и др. Этот метод применяют при окончательной чистовой обработке; в отдельных случаях комбинированное термомеханическое воздействие на материал предшествует финишной обработке резанием.

5.1.8. Метод резания с целенаправленным изменением напряженно-деформированного состояния в зоне обработки

Сущность метода заключается в создании в зоне обработки с помощью дополнительных устройств (приспособлений) полей напряжений и деформаций, которые в совокупности с возникающим при стружкообразовании напряженно-деформированным состоянием материала обеспечивают благоприятные условия для формирования обработанной поверхности изделия и удаления стружки.

При обработке ПКМ действующие в зоне резания напряжения и деформации могут вызывать значительные сложности в обеспечении качества обработанных поверхностей. Это связано с образованием поверхностных и внутренних дефектов: трещин, расслоений, локальных выкрашиваний связующего и ско-

лов материала, особенно в местах входа и выхода инструмента, ворсистости и разлохмачивания перерезанных волокон в местах резких переходов сопрягаемых поверхностей и др.

Создание дополнительного поля сжимающих напряжений в зоне обработки введением дополнительной механической энергии препятствует смещению поверхностных слоев КМ в направлении действия силы резания, предотвращает образование трещин, расслоений и сколов.

Метод резания с целенаправленным изменением напряженно-деформированного состояния в зоне обработки может применяться при выполнении всех видов лезвийной и абразивной обработки, которым подвергаются материалы и изделия из ПКМ.

5.1.9. Прогрессивные технологии, основанные на совершенствовании элементов технологической системы

Важным направлением повышения эффективности обработки ПКМ является совершенствование конструкций режущего инструмента. Примером удачных решений могут служить технологические решения, касающиеся изготовления отверстий в КМ. Обычно при использовании осевого инструмента (сверло, зенкер, развертка, зенковка, цековка) значительные трудности возникают при формировании входа в отверстие. Действующие на периферии инструмента силовые факторы приводят к расслаиванию материала, образованию макротрещин, смещению и выдавливанию вверх наружных слоев КМ. При обработке волокнистых ПКМ, склонных к образованию ворса, на кромках отверстий образуются пучки из неперерезанных волокон (рис. 5.7).

Отслоения материала и поднятие ворса на входе в отверстие удастся практически исключить, используя в технологическом процессе предварительное засверливание отверстия на глубину 0,5...0,8 мм сверлом с центром и периферийными

подрезателями (по ГОСТ 22053—86), имеющими специальную, оптимальную для конкретного обрабатываемого материала и диаметра отверстия геометрию заточки (рис. 5.8). Последующая обработка отверстия основным рабочим инструментом позволяет сохранить полученное при предварительном кольцевом прорезании верхних слоев материала относительно высокое качество кромок отверстия.

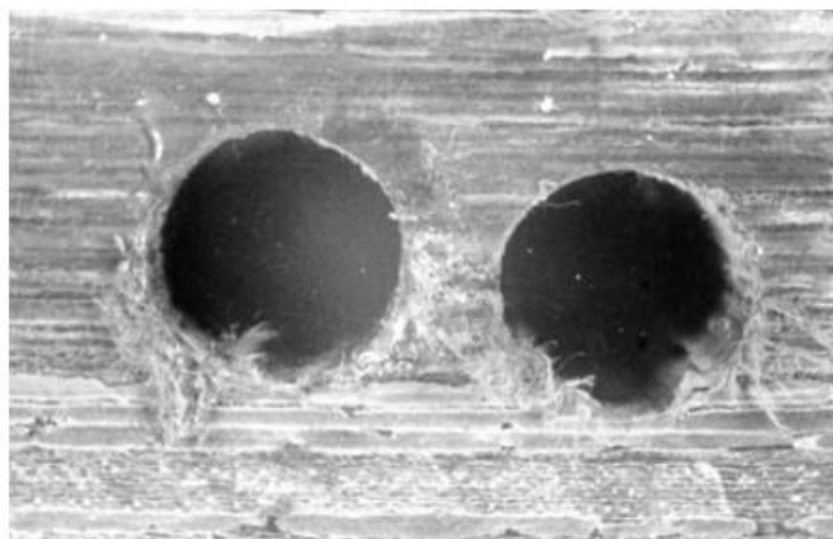


Рис. 5.7. Вид отверстий на входе инструмента при сверлении волокнистых ПКМ (материал — слоистый ГКМ стеклопластик-органопластик)

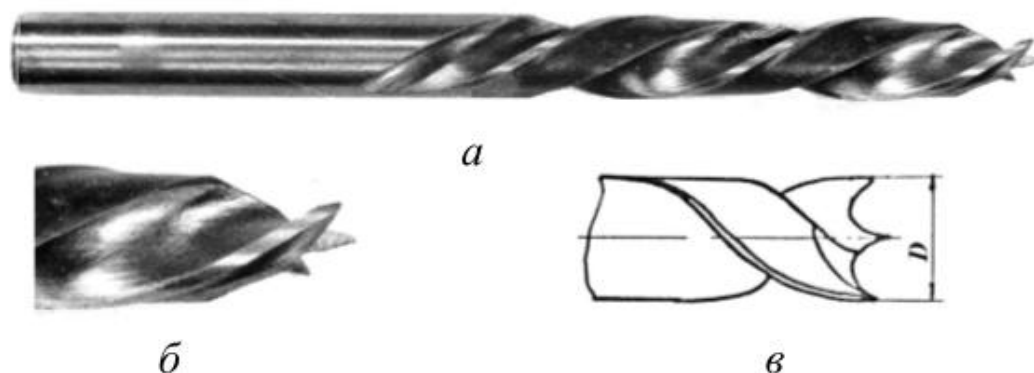


Рис. 5.8. Сверло с центром и периферийными подрезателями:
а — общий вид; *б* — вид режущей кромки; *в* — форма рабочей части

Особую проблему представляет технологическое обеспечение качества обработки слоистых ГKM, состоящих из чередующихся слоев различных KM, например стеклопластик-органопластик, органопластик-углепластик и т. п. При обработке ГKM режущий инструмент поочередно взаимодействует с материалами, свойства которых как объекта обработки резанием существенно различаются. Это крайне затрудняет обеспечение рациональных условий обработки в целом, но главное — обработанные поверхности, особенно поверхности выполненных отверстий, имеют низкое качество.

Так, если при сверлении ось отверстия перпендикулярна расположению слоев из разных KM, то на обработанной поверхности образуются кольцевые выступы и впадины (рис. 5.9), вызванные разными упругими свойствами (упругим последствием) материалов, которые составляют конструкцию ПКМ. Например, при обработке слоистых ГKM стеклопластик-органопластик сверлами диаметром 13 мм кольцевые слои органопластика дают усадку (уменьшение диаметра отверстия) 0,10...0,12 мм. Кроме того, на их поверхностях образуется значительный по высоте ворс. Слои стеклопластика, наоборот, испытывают разбивку отверстия (увеличение диаметра) до 0,05 мм.

Для обработки отверстий в многослойных ГKM разработано сверло специальной конструкции. Режущая часть сверла выполнена в виде пластины, которая наряду с главными режущими кромками и перемычкой (как у обычного спирального сверла) имеет две вспомогательные подрезающие кромки (см. рис. 5.9). Вспомогательные кромки расположены на противоположном от главных режущих кромок торце пластины и направлены в сторону хвостовика сверла. Особенности обработки таким инструментом на примере сверления отверстия в ГKM, состоящем из чередующихся слоев стеклопластика и органопластика, показаны на рис. 5.9.

Сначала при рабочем ходе инструмента сверление осуществляется главными режущими кромками с поочередным

перерезанием слоев, например стеклопластика, органо-пластика, и т. д. Главные режущие кромки имеют рациональную применительно к обработке стеклопластика геометрию заточки. Вспомогательные подрезающие кромки в работе не участвуют. При этом слои органопластика дают усадку и образуют ворсистую поверхность. При выводе инструмента работают только вспомогательные подрезающие кромки, имеющие рациональную геометрию заточки применительно к обработке органопластика. Острозаточенные подрезатели выполняют функцию дополнительного рассверливания или зенкерования, удаляют разлохмаченные и выступающие за пределы обработанной поверхности участки слоев органо-пластика, не затрагивая основных слоев стеклопластика.

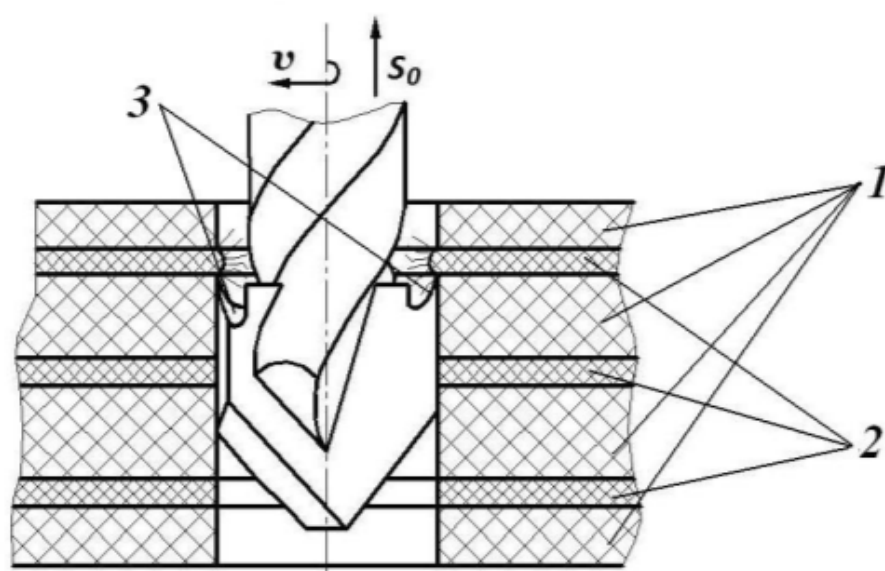


Рис. 5.9. Схема обработки резанием слоистого ГKM сверлом с вспомогательными подрезающими кромками:

1 — стеклопластик; 2 — органопластик; 3 — подрезающие кромки

Применение такого сверла, которым можно осуществлять процесс резания как при прямом, так и при обратном ходе инструмента, поочередно создавая оптимальные условия обработки для каждого слоя, составляющего ГKM, позволяет повысить производительность и качество обработки много-

слойных ГKM, особенно в тех случаях, когда физико-механические свойства армирующих компонентов существенно различаются.

Условия эксплуатации или эстетические требования к изделию зачастую определяют жесткие требования к качеству обработки, геометрическим свойствам поверхностей — их микро- и макрогеометрии.

Проблема обеспечения заданных параметров качества поверхностного слоя особенно актуальна для тяжелонагруженных изделий из ПКМ (корпуса двигателей летательных аппаратов, сосуды давления и др.), получаемых серийно методом «мокрой» намотки. На поверхности таких изделий имеются потеки связующего, сползшие жгуты арматуры и другие аналогичные дефекты, что во многих случаях не допускается требованиями конструкторской документации. Вместе с тем применение контурного точения для чистовой обработки поверхности и устранения ее дефектов не представляется возможным в связи с большой вероятностью перерезания режущей кромкой инструмента армирующих волокон силовой оболочки.

В этом случае рекомендуют применять специально разработанный инструмент — эластичный резец для зачистки поверхности изделий из ПКМ, позволяющий предотвратить повреждение силовой оболочки. Перемещение режущей части инструмента в направлении обрабатываемой поверхности изделия передается посредством пружины. При соприкосновении режущей кромки и слоев силовой оболочки возрастающая сила резания сжимает пружину и смещает режущую часть, что исключает перерезание армирующих слоев изделия. Конструктивные параметры резца (геометрические параметры режущей части, ее угловые перемещения при обработке фасонных поверхностей, жесткость пружины, сила предварительного сжатия и др.) определяют опытным путем.

Применение описанного инструмента при выполнении операции зачистки малогабаритных корпусов двигателей из стеклопластика на станке модели 16K20PФ3C32 позволило

обеспечить удаление наплывов связующего и сползших жгутов арматуры, необходимые макрогеометрию и аэродинамические свойства поверхности, кроме того, снизить значение параметра шероховатости примерно в 4 раза без повреждения силовой оболочки.

Отметим, что применение новых методов, реализация эффективных технологий обработки ПКМ во многих случаях вызывают необходимость модернизации технологического оборудования, разработки специальных устройств и приспособлений. Примерами модернизации средств технологического оснащения могут служить установка дополнительного суппорта на металлорежущий станок и нагружающего устройства для осуществления резания с предразрушением (см. подразд. 5.1.3); использование специальных устройств для комбинированного теплового и механического воздействия на материал (см. подразд. 5.1.7); применение приспособлений, позволяющих изменять напряженно-деформированное состояние материала в зоне резания (см. подразд. 5.1.8), и т. п.

Одним из специфических свойств ПКМ является их гигроскопичность, т. е. предрасположенность к водопоглощению посредством заполнения структурных дефектов материала водой, что приводит к ухудшению их прочностных характеристик, диэлектрических свойств, в отдельных случаях к изменению размеров и формы готовых изделий. Все это затрудняет применение СОЖ при обработке ПКМ лезвийными и абразивными инструментами. Обработка без использования СОЖ значительно снижает обрабатываемость резанием этих материалов, отличающихся склонностью к термомеханической деструкции при низких температурах.

Одним из способов совершенствования процесса резания ПКМ является применение специальных составов СОЖ, которые, оказывая комплексное воздействие на материал, не только не ухудшают исходных свойств материала, но и служат эффективным средством, способствующим повышению отдельных эксплуатационных характеристик изделий. К специ-

альным СОЖ относятся, в частности, так называемые гидрофобные СОЖ, которые образуют покрытия, защищающие обработанную поверхность от неблагоприятного действия влаги.

Примером гидрофобной технологической среды является раствор СОЖ со специальными присадками из кремнийорганических соединений группы Si–H. Присадка взаимодействует с материалом обработанной поверхности изделия, образуя при этом гидрофобные слои и пленки. Применение СОЖ на основе кремнийорганических соединений придает изделию водоотталкивающие свойства и тем самым способствует уменьшению водопоглощения, стабилизации показателей точности изготовления и весовых характеристик изделий из ПКМ.

5.2. Технологические проблемы и примеры их решения. Практические рекомендации

Большое разнообразие конструкций из КМ, технологий и режимов их первичного формообразования приводит к созданию нового КМ. При принятии решения о дальнейшей обработке КМ резанием требуется индивидуальный подход, при этом необходимо учесть наследуемые признаки первичных технологий формообразования и обеспечить оптимальные свойства, связанные с предполагаемыми условиями эксплуатации изделия. Многообразие получаемых КМ обуславливает множество задач и столько же технологических решений, связанных с проблемами их обработки резанием.

Наиболее технологически сложными задачами при производстве изделий из ПКМ являются обеспечение принципиальной возможности использования методов окончательной обработки; повышение производительности обработки; достижение требуемого качества поверхностного слоя деталей из ПКМ; обработка резанием конструкций малой жесткости; обеспечение стружкодробления; увеличение периода стойкости режущего инструмента и др. Как правило, при отработке технологии изготовления изделий одновременно

решают несколько указанных задач, что для достижения результата в большинстве случаев требует принятия нестандартных решений.

5.2.1. Обеспечение принципиальной возможности обработки резанием

В производственной практике проблема обеспечения принципиальной возможности механической обработки того или иного КМ находит решение в использовании метода резания с технологическим наполнителем (см. подразд. 5.1.5).



Рис. 5.10. Общий вид каркаса исходной заготовки из УУКМ

Большую сложность представляет изготовление деталей из УУКМ малой плотности (меньше 1400 кг/м^3). Исходной заготовкой в этом случае является каркасная конструкция наполнителя (арматуры) из углеграфитовых стержней. Применяемые в настоящее время структуры каркасных конструкций УУКМ весьма разнообразны и классифицируются по геометрическим параметрам. На рис. 5.10 показан общий вид одной из разновидностей каркасов, имеющей ортогональную 3D-структуру многонаправленного армирования

(рис. 5.11). Для создания наиболее благоприятных условий пропитки каркаса связующим веществом и обеспечения высокого качества рабочих поверхностей детали из УУКМ исходной заготовке в процессе предварительной обработки необходимо придать конфигурацию, приближающую ее к готовому изделию. Вместе с тем до пропитки каркаса связующим и последующего отверждения его конструкция представляет собой набор практически не связанных между собой углеродных стержней (см. рис. 5.11), имеющих поры размером до 2 мм. Обычная механическая обработка такой конструкции не представляется возможной.

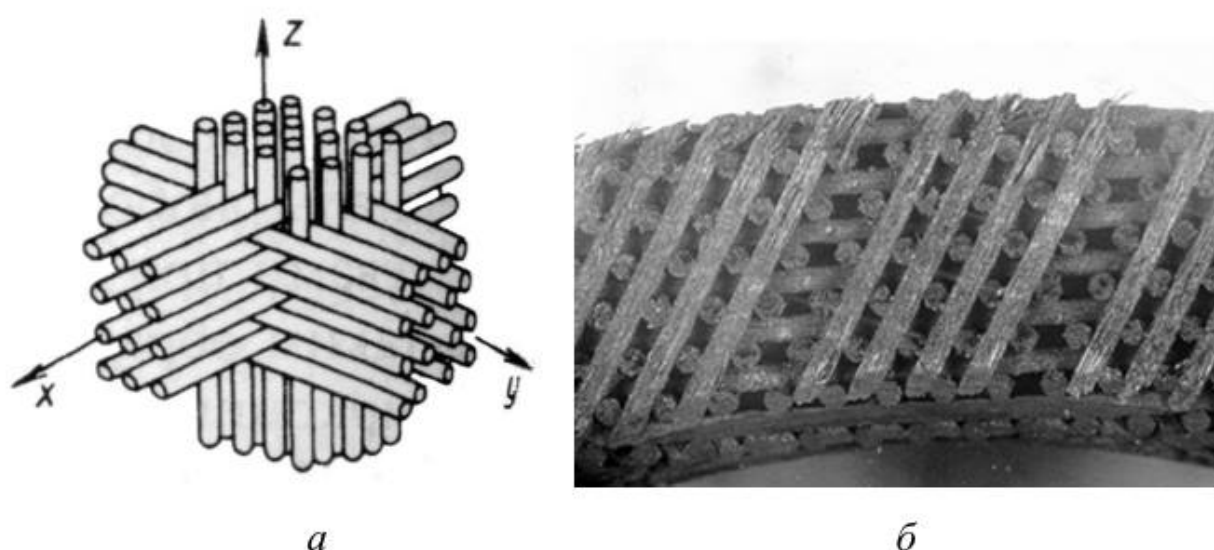


Рис. 5.11. Пример структуры (а) и общий вид фрагмента (б) каркаса из УУКМ

Эту задачу эффективно решают с помощью метода заморозки (см. подразд. 5.1.5). Предварительно каркас пропитывают водой в вакуумной камере, замораживают в криостате, заполненном жидким азотом (77 К), затем в замороженном состоянии подвергают всем необходимым операциям механической обработки. По окончании процесса формообразования резанием проводят промывку изделия теплой водой, что обеспечивает его размораживание и удаление остатков стружки и пыли, а затем сушат в вакуумной сушильной печи. После этого изделие проходит все последующие технологи-

ческие операции, в том числе пропитку связующим, карбонизацию, графитизацию, окончательную механическую обработку и др. На рис. 5.12, 5.13 показаны изделия из УУКМ на разных стадиях их изготовления.



Рис. 5.12. Заготовки деталей типа «кольцо» (слева) и «тарель» (справа), полученные обработкой каркасов резанием до их пропитки связующим



Рис. 5.13. Общий вид детали типа «тарель» после окончательной механической обработки резанием

Основными этапами технологии обработки каркаса из УУКМ с заморозкой являются следующие:

- 1) пропитка исходной заготовки в вакуумной камере (20 мин);
- 2) заморозка в криостате, заполненном жидким азотом (77 К; 120 мин);
- 3) выполнение всех операций механической обработки резанием заготовки в замороженном состоянии;
- 4) промывка изделия теплой водой (30...40 °С);
- 5) сушка в вакуумной печи (60...70 °С, 6...10 ч).

5.2.2. Повышение производительности обработки

Повышение производительности обработки достигается применением таких нетрадиционных технологий, как МШС, высокоскоростное резание, их комбинации и др.

Так, применение МШС при производстве корпусов малогабаритных ракетных двигателей из стеклопластика (рис. 5.14) в условиях крупносерийного производства позволило добиться кардинального повышения производительности механической обработки резанием.

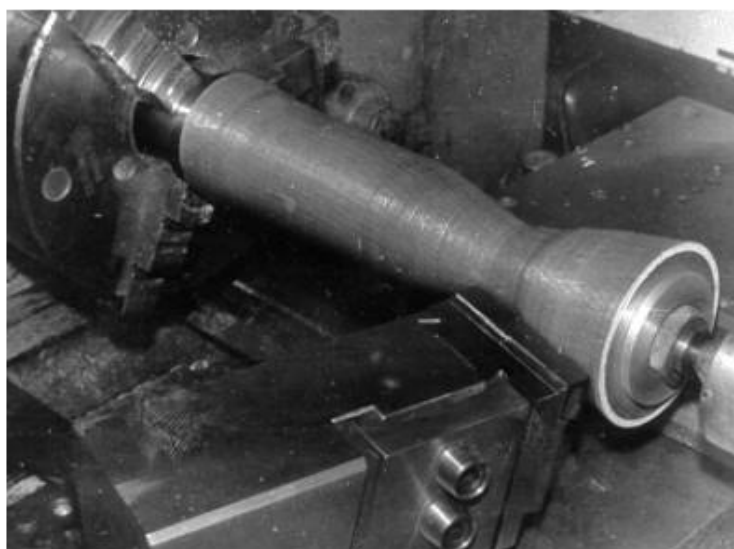


Рис. 5.14. Вид заготовки корпуса двигателя из стеклопластика, установленной на токарном станке

Базовым методом обработки таких изделий на предприятии до внедрения новой технологии было контурное обтачивание фасонной поверхности раструба на станках с ЧПУ (модель 16K20РФ3С32). Применение МШС вместо контурного точения обеспечило повышение производительности процесса обработки в 21 раз. В качестве инструмента в этом случае использовали резцовый блок (рис. 5.15) с инструментальными вставками из твердого сплава ВК6, спрофилированными в соответствии с расчетным контуром раструба изделия. Время обработки поверхности раструба широколезвийным инструментом составило 6 с вместо 2,1 мин; износ режущей кромки по задней поверхности — примерно 1 мкм/изделие. В результате была обеспечена высокая идентичность конфигурации и размеров профиля раструба в больших партиях изготавливаемых изделий одного наименования, что является важной эксплуатационной характеристикой конструкции.

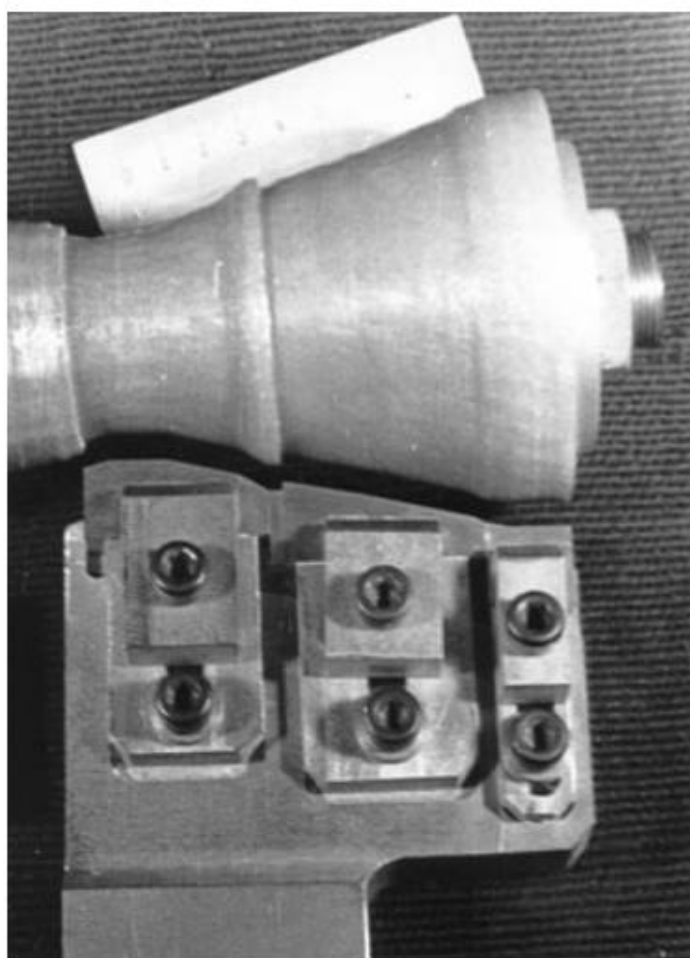


Рис. 5.15. Резцовый блок для изготовления наружной поверхности раструба корпусного изделия с применением МШС

Другим примером эффективности МШС является применение его при производстве крупногабаритных цилиндрических контейнеров-отсеков, оболочка которых выполняется в виде трехслойной панели. Между внутренней и внешней обшивками (несущими слоями оболочки) по длине контейнера на определенном расстоянии один от другого размещены шпангоуты из стеклопластика, полученные методом намотки и выполняющие роль внутреннего каркаса-формоносителя. При изготовлении контейнера наиболее трудоемкой операцией механической обработки является обтачивание боковых (правой и левой) фасонных поверхностей шпангоутов. По типовой технологии фасонный профиль обрабатывают последовательно комплектом из шести резцов (трех правых и трех левых). При применении МШС для обработки одного шпангоута используют одновременно два резца, обеспечивающие формирование необходимого фасонного профиля за один проход, что дает возможность увеличить интенсивность процесса резания в 5–8 раз. При одновременной обработке на станке N шпангоутов производительность обработки увеличивается в $(5...8)N$ раз. При токарной обработке фасонных поверхностей стыковочных узлов контейнера применение МШС снижает машинное время в 6 раз.

5.2.3. Увеличение периода стойкости режущего инструмента

Для решения задач, связанных с увеличением периода стойкости режущего инструмента, разработан метод резания с предразрушением срезаемого слоя (см. подразд. 5.1.3). В то же время практически каждый из представленных в учебном пособии методов обработки, имеющий свою основную технологическую направленность, способствует и повышению периода стойкости инструмента. Эффективность использования этих методов в каждом случае будет зависеть от свойств обрабатываемых ПКМ и других условий обработки.

Метод резания с предразрушением срезаемого слоя (см. подразд. 5.1.3) является особенно эффективным средством повышения стойкости режущего инструмента при обработке ПКМ и других КМ, отличающихся малой пластичностью. В качестве примера рассмотрим результаты использования этого метода при токарной обработке цилиндрических заготовок из стеклопластика тканевой намотки марки СТК-114 (рис. 5.16). Механическое воздействие на материал срезаемого слоя производили путем накатывания цилиндрическим рифленным роликом (см. рис. 5.3, а) из стали 40Х (HRC 50–52). Накатывание с силой P_0 осуществляли специальным гидравлическим накатным устройством, установленным на дополнительном суппорте токарно-винторезного станка с противоположной от резца стороны заготовки.

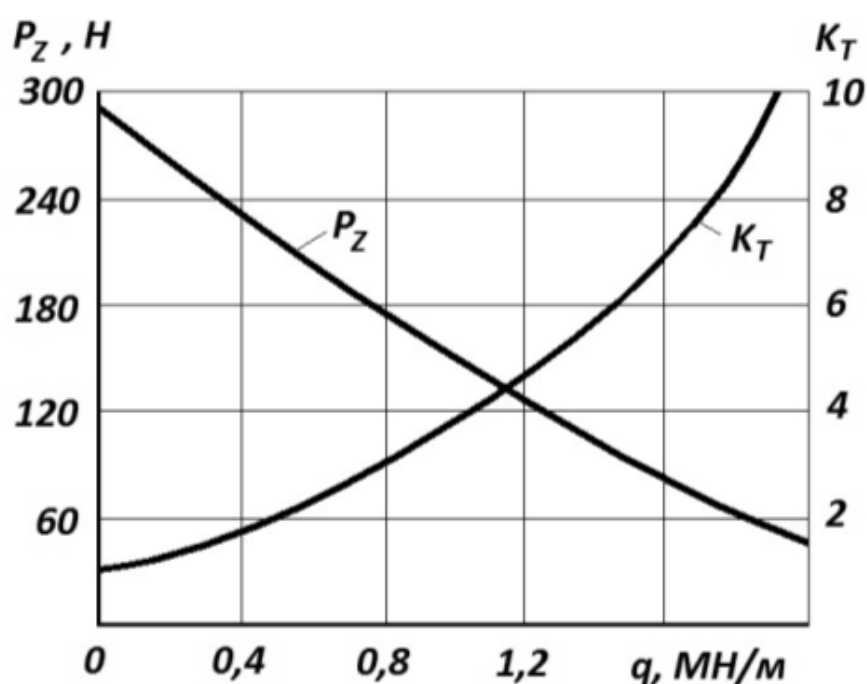


Рис. 5.16. Зависимость главной составляющей P_z силы резания и коэффициента относительного изменения периода стойкости режущего инструмента $K_T = T_0/T$ от линейной нагрузки q накатного ролика при точении стеклопластика с предразрушением ($v = 1,5$ м/с; $S = 0,3$ мм/об; $t = 2$ мм)

На рис. 5.16 показано изменение главной составляющей P_z силы резания и коэффициента относительного изменения периода стойкости инструмента $K_T = T_0/T$ (T — период стойкости инструмента при обычном резании; T_0 — период стойкости инструмента при резании с предразрушением срезаемого слоя) в зависимости от линейной нагрузки $q = P_0/l_k$ (где l_k — длина контакта рабочего участка ролика и поверхности резания на заготовке). На рисунке видно, что увеличение линейной нагрузки q на поверхность резания вызывает монотонное уменьшение составляющей P_z силы резания и, как следствие, увеличение периода стойкости инструмента T_0 . При значении $q = 2$ МН/м период стойкости инструмента увеличивается более чем в 10 раз по сравнению со стойкостью при обычном резании.

В целом при резании с предразрушением стеклопластиков и углепластиков с относительно хрупкой матрицей, таких, как АГ-4С, 3К1Ф3, СВАН 1:1, ВХ7-350-42, КМУ-2Л и другие, период стойкости инструмента увеличивается в 5–12 раз.

Высокая эффективность метода резания с предразрушением срезаемого слоя достигается при обтачивании песчано-полимерных оправок, используемых для намотки крупногабаритных корпусных изделий из ПКМ. Материал оправки представляет собой композицию из частиц кварцевого песка, склеенных поливиниловым спиртом, и отличается малой пластичностью и высокими абразивными свойствами. После сборки элементов оправки предусмотрена ее механическая обработка, которую производят с помощью инструментальных наладок, оснащенных вставками из дорогостоящих синтетических алмазов. При этом припуск на обработку h достигает 10...15 мм. Применение резания с предразрушением срезаемого слоя позволяет разрушать основную часть припуска воздействием на срезаемый слой накатного ролика. В результате режущим инструментом удаляют лишь небольшой слой материала (до 2 мм), что обеспечивает необходимое качество обработки. Это позволяет значительно со-

кратить расход инструментальных материалов и уменьшить себестоимость процесса обработки.

5.2.4. Технологическое обеспечение качества обработки

Основной проблемой любой технологии является обеспечение качества изделия. Задача получения требуемого качества актуальна при выполнении всех видов обработки резанием изделий из ПКМ, отличающихся от других конструкционных материалов своеобразием свойств и строения. Особенности ПКМ во многих случаях делают невозможным достижение требуемых значений показателей качества обработанного изделия при использовании традиционных подходов и технологических рекомендаций.

Для решения этой проблемы созданы специальные технологии, такие, как метод резания с ДТП, метод резания с технологическим наполнителем, методы терморезания, метод термомеханической обработки ПКМ, метод резания с целенаправленным изменением напряженно-деформированного состояния, а также технологии, основанные на совершенствовании отдельных элементов технологической системы.

Токарная обработка волокнистых материалов, полученных намоткой, особенно органопластиков, во многих случаях сопровождается образованием трещин, расслоений, смещением под воздействием осевой составляющей P_x силы резания отслоившихся фрагментов поверхностных слоев в направлении оси заготовки, разломачиванием перерезанных волокон арматуры на поверхности резания (рис. 5.17 — поверхность l_1 , рис. 5.18, а).

Высокого качества обработанной поверхности и увеличения производительности труда при точении волокнистых материалов достигают созданием в зоне резания области сжимающих напряжений (см. подразд. 5.1.8). В этом случае процесс резания совмещают с дополнительным механическим воздействием накатного ролика под нагрузкой на уча-

сток обрабатываемой поверхности заготовки, непосредственно примыкающей к зоне стружкообразования (см. рис. 5.17). Оптимальное расстояние между участком контакта ролика с обрабатываемой поверхностью и главной режущей кромкой составляет 0,05...0,20 мм.



Рис. 5.17. Обтачивание заготовки из органопластика с применением устройства для создания в зоне резания сжимающих напряжений:

l_1 — поверхность, обработанная стандартным резцом; l_2 — участок поверхности, выполненный резанием с действием нагружающего ролика; 1 — токарный резец; 2 — нагружающий ролик

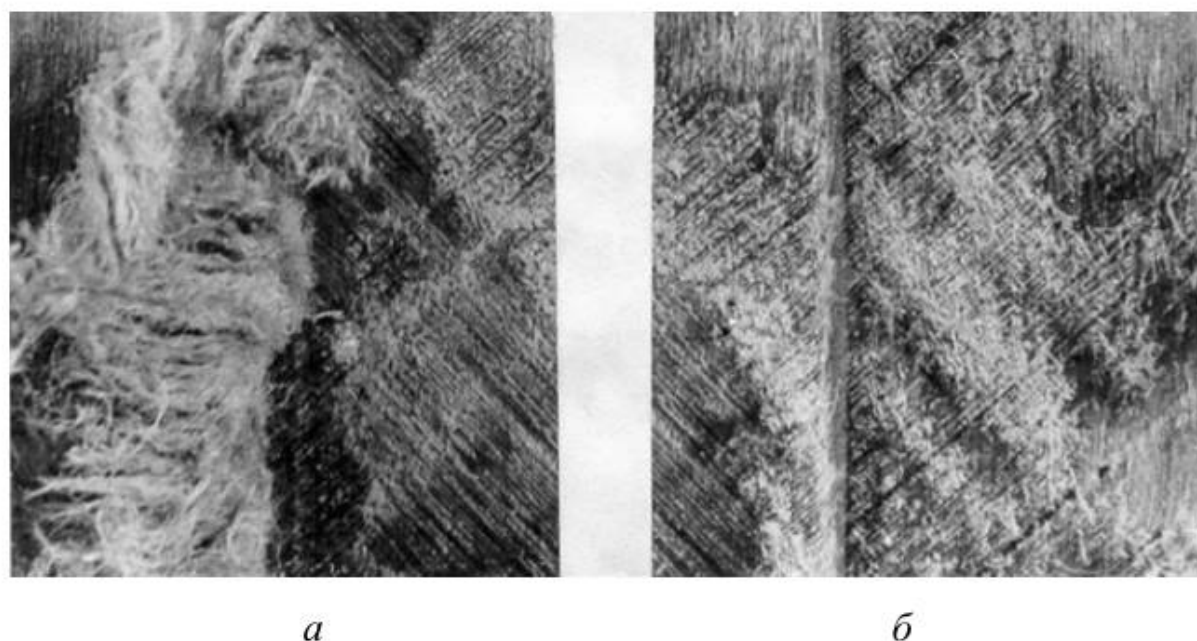


Рис. 5.18. Общий вид поверхности изделия из органопластика: а — при точении стандартным инструментом; б — при точении инструментом с нагружающим роликом

Сжимающие напряжения в зоне резания способствуют существенному повышению качества обработанной поверхности: препятствуют расслоению и смещению поверхност-

ных слоев КМ в зоне обработки, исключают возможность появления сколов и трещин под обработанной поверхностью, позволяют сохранять исходную структуру и характеристики обрабатываемого материала по сечению. Такой метод дает возможность формировать поверхности сложной конфигурации, получать четко выраженные кромки на границе сопрягаемых поверхностей в местах уступов, например на границе поверхности резания и обрабатываемой поверхности заготовки (см. рис. 5.17, 5.18, б). Так, на рис. 5.18, б поверхность резания отчетливо видна в виде вертикальной прямой, в то время как при точении по стандартной схеме (см. рис. 5.18, а) граница этой поверхности неопределенна вследствие наслоений ворса. Кроме того, при создании сжимающих напряжений в зоне резания создаются благоприятные условия для дробления сходящей стружки.

Специфические проблемы технологического обеспечения качества поверхностного слоя возникают при обработке резанием сквозных цилиндрических и контурных отверстий в оболочковых конструкциях из ПКМ. В этом случае при выходе режущего инструмента из обработанного отверстия на внутренней, свободной поверхности изделия образуются сколы, отслоения материала, вытесненные за границы обработанной поверхности разорванные (неперерезанные) слои материала и вырванные волокна. В большинстве случаев перечисленные дефекты в конструкциях технических объектов являются недопустимыми. Особенно серьезные трудности, связанные с указанными явлениями, возникают при получении качественных изделий из КМ, отличающихся повышенной склонностью к хрупкому разрушению, и органопластиков.

Характерными видами работ, при которых требуется решение подобных технологических задач, являются разрезание отрезными резцами или дисковыми фрезами цилиндрических оболочек, вырезание, осевая обработка сквозных отверстий, периферийное фрезерование концевыми фрезами фасонных отверстий (под люки и т. п.), прерывистое точение,

подрезание торцовых поверхностей со свободным выходом инструмента и др.

Высокое качество обработанной поверхности на выходе инструмента может быть обеспечено, если на внутренней поверхности оболочковой конструкции или пластины в зоне резания будут созданы сжимающие напряжения (см. подразд. 5.1.8), препятствующие разрушению КМ под воздействием режущего инструмента за пределами линии среза.

В качестве примера на рис. 5.19 приведен общий вид цилиндрической разжимной оправки для разрезания заготовки из органопластика, имеющей участок поверхности в виде тонкостенной трубы. Заготовку устанавливают на оправку. Набор трех разрезных колец вследствие их деформирования осевой силой создает равномерный натяг по внутренней поверхности изделия.

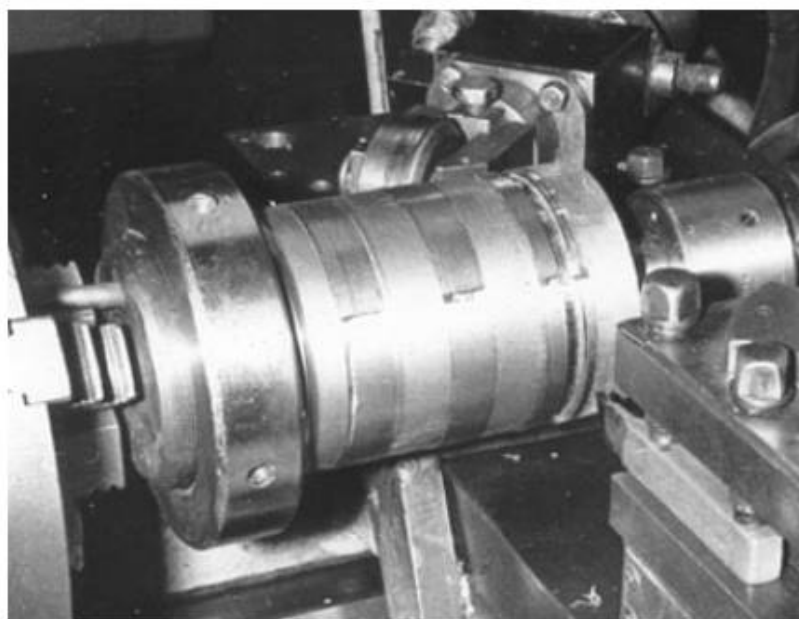


Рис. 5.19. Общий вид оправки для разрезания цилиндрического изделия, установленной на токарном станке

Разрезание осуществляют отрезным резцом, выходящим в соответствующую канавку глубиной около 2 мм, выполненную на разрезном кольце оправки (см. рис. 5.19). Ширина канавки превосходит ширину главной режущей кромки от-

резного резца не более чем на 0,1 мм. В результате плотного контакта заготовки с поверхностью приспособления формируются необходимые сжимающие напряжения в зоне обработки. Применение такого устройства позволяет исключить расслоения материала на выходе инструмента и обеспечивает получение «острой» внутренней кромки. Устройство, показанное на рис. 5.19, может использоваться и при разрезании изделия дисковой фрезой соответствующей ширины круговым фрезерованием.

Метод создания предварительного напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала находит применение при контурном фрезеровании в оболочковых конструкциях сквозных отверстий разной конфигурации (окна, люки, проемы и др.). При этом положение паза на базовой поверхности нагружающего устройства должно быть согласовано с траекторией относительного перемещения фрезы, а ширина паза должна соответствовать диаметру концевой фрезы.

При прерывистом резании типичным дефектом является образование сколов материала обработанной поверхности на входе и выходе режущего инструмента (рис. 5.20). Для создания условий, исключающих сколы на границах обрабатываемого участка поверхности, применяют накладки из другого материала, например стали, плотно прилегающие к боковым поверхностям заготовки на входе и выходе инструмента. В процессе резания накладки изменяют (раздвигают) границы обрабатываемого участка и позволяют сохранить кромки изделия неповрежденными. В этом случае применение накладок создает благоприятное напряженно-деформированное состояние материала в зоне резания (см. подразд. 5.1.8) при удалении срезаемого слоя на критических, наиболее склонных к образованию дефектов участках поверхности заготовки.

Большая доля механической обработки изделий из ПКМ приходится на обработку отверстий. Сложность технологи-

ческого обеспечения качества при выполнении отверстий сопряжена с устранением (или предупреждением появления) специфичных дефектов, проявляющихся как на цилиндрической (конической) поверхности отверстия, так и на входе в отверстие и выходе из него при обработке практически всех ПКМ. Такие дефекты в наибольшей степени проявляются при обработке органопластиков.



Рис. 5.20. Вид сколов, образующихся при точении торцовой поверхности изделия «диск» из стеклопластика с короткими армирующими волокнами

Обработка отверстий в органопластике отличается усадкой отверстия (примерно 0,1 мм на 10 мм диаметра отверстия). После сверления на поверхности образуются локальные микро- и макродефекты, большая часть обработанной поверхности покрыта ворсом. При наиболее благоприятных режимах сверления шероховатость свободных от ворса участков поверхности составляет $R_z = 25 \dots 28$ мкм.

Улучшения качества обработки достигают применением метода резания с ДТП (см. подразд. 5.1.4). Наименьшее зна-

чение шероховатости поверхности после осевой обработки ($R_z = 12,7$ мкм) имеет место в случае, если при рассверливании отверстий нанесенный слой ДТП (например, ЭДТ-10) удаляется полностью, т. е. при условии совпадения диаметра сверла с диаметром отверстия после обычного сверления с учетом его усадки. Следовательно, при рассверливании ДТП диаметр сверла должен быть скорректирован соответственно усадке отверстия. В этом случае ворс удаляется практически полностью, а покрытие заполняет микронеровности предварительно обработанной поверхности.

Эффективным средством уменьшения шероховатости поверхностей отверстий после сверления является их развертывание с предварительным нанесением слоя ДТП, что улучшает исходную шероховатость после сверления до $R_z = 3,8$ мкм.

При обработке отверстий, ось которых параллельна слоям в многокомпонентных ГKM, снижение ворсистости и повышение качества поверхностного слоя в случае применения резания с ДТП обеспечивают за два приема. На полученную сверлением поверхность отверстия наносят ДТП, которое после отверждения удаляют рассверливанием в тот же размер. Повторное нанесение покрытия и развертывание отверстия после его отверждения позволяет существенно повысить точность формы и размера отверстия, снизить ворсистость поверхности, но не исключить ее полностью.

Высокого качества обработки канала отверстия достигают применением метода резания с комбинированным тепловым и механическим воздействием на материал (см. подразд. 5.1.7). При сверлении, рассверливании, зенкеровании и развертывании сквозных отверстий для дополнительного нагрева формируемой поверхности представляется наиболее целесообразным использовать теплоту, образующуюся при трении инструмента и обрабатываемого материала. Для этого цилиндрический хвостовик осевого инструмента изготавливают удлиненным и несколько большего диаметра, чем диаметр получаемого отверстия. В процессе обработки

инструмент после прохода его режущей части на всю длину смещают в направлении движения подачи. В результате цилиндрический хвостовик инструмента с натягом входит в полученное отверстие. Вращение инструмента и давление сжатия цилиндрической части хвостовика вызывают интенсивный нагрев обрабатываемой поверхности вследствие действия сил трения. В результате происходят размягчение материала поверхностного слоя, перераспределение связующего, заполнение впадин микрорельефа, формирование нового поверхностного слоя КМ, параметр шероховатости которого зависит от микрогеометрии формирующей части хвостовика инструмента.

При правильно выбранных условиях обработки метод резания с ДТП позволяет полностью устранить ворс и обеспечить высокое качество обработки. Важнейшим технологическим параметром в этом случае является максимальная температура на стыке трения, которая определяется временем контакта вращающейся цилиндрической части хвостовика и обрабатываемой поверхности (обычно несколько секунд).

При повышенных значениях температуры на поверхности отверстия образуется тонкий коксовый слой, претерпевший термомеханическую деструкцию и имеющий малую пластичность. Этот слой легко удаляется режущим инструментом, что позволяет обеспечить высокое качество обработанной поверхности. Такую технологию можно использовать для обработки отверстия в окончательный размер.

Значительные трудности в обеспечении качества при обработке отверстий в волокнистых ПКМ возникают на входе инструмента: на кромках отверстий образуются расслоения материала, перерезание волокон сопровождается частичным вытеснением их в сторону свободной поверхности и образованием ворса (см. рис. 5.7).

Устранить эти дефекты позволяет метод резания с ДТП. Нанесение на участки поверхности в месте обработки тонкого слоя (толщиной примерно 0,3...0,5 мм) технологического по-

крытия (рис. 5.21) создает условия для формирования четких кромок отверстия в ПКМ при врезании инструмента, предотвращает разрушение и смещение поверхностных слоев материала, препятствует появлению ворса на входе инструмента при сверлении, зенкеровании и зенковании цилиндрических или конических углублений для крепежных деталей.

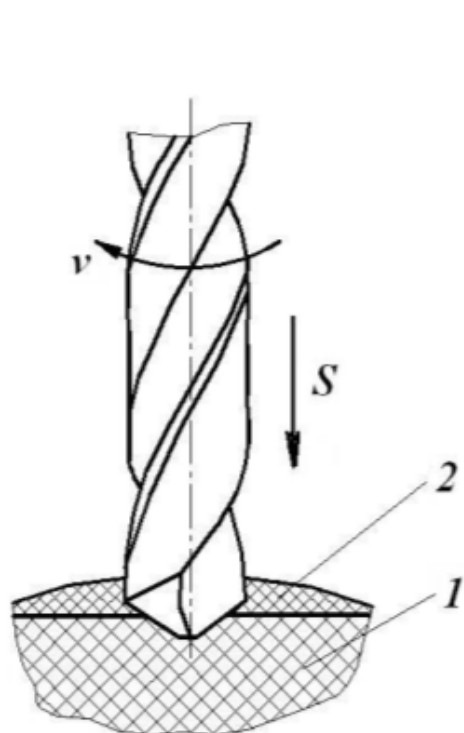


Рис. 5.21. Схема обработки отверстия с применением ДТП:
1 — обрабатываемый КМ; 2 — дополнительное технологическое покрытие

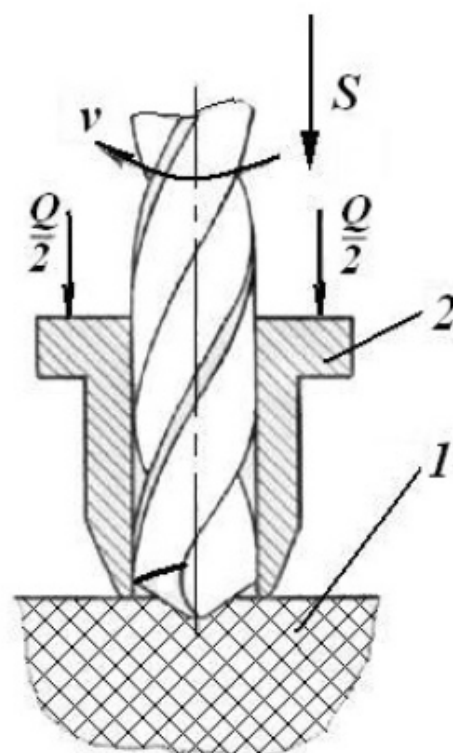


Рис. 5.22. Схема обработки отверстия с применением прижимной втулки, имеющей острые кромки:
1 — заготовка; 2 — прижимная втулка; Q — сила прижима

Подобного эффекта достигают при использовании прижимной втулки типа кондукторной (рис. 5.22). Острые края втулки с определенным усилием внедряют в обрабатываемый материал на глубину примерно 0,5 мм и создают поле сжимающих напряжений в наружных слоях материала (см. подразд. 5.1.8), препятствующее разрушению и расслоению КМ под воздействием силы резания при врезании осевого инструмента.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность и назначение метода широких срезов? Приведите схему обработки резанием с применением МШС.
2. Каковы технологические возможности МШС?
3. Чем обеспечивается идентичность конфигурации обработанных фасонных поверхностей при изготовлении больших партий изделий с применением МШС?
4. Вследствие чего резко увеличивается период стойкости режущего инструмента при применении МШС?
5. Какие области применения наиболее эффективны для резания с помощью МШС?
6. Чем ограничивается увеличение скорости резания при обработке ПКМ?
7. Какой физический механизм обуславливает возможность обработки ПКМ с закритическими скоростями резания?
8. Какой режим обработки ПКМ называют высокоскоростным резанием?
9. В чем заключается физическая сущность метода резания с предразрушением срезаемого слоя?
10. Какие методы поверхностного пластического деформирования используют для дополнительного воздействия на срезаемый слой материала?
11. Как назначают параметры режима обработки при точении с предразрушением срезаемого слоя?
12. Для материалов с какими свойствами применение метода резания с предразрушением срезаемого слоя наиболее эффективно?
13. Какова сущность метода резания с ДТП?
14. Какие технологические задачи решают применением метода резания с ДТП?
15. Каковы технологические возможности метода резания с ДТП?

16. При выполнении каких видов работ применяют метод резания с ДТП?

17. При обработке каких заготовок из ПКМ применяют метод резания с технологическим наполнителем?

18. Какие вещества используют в качестве технологического наполнителя?

19. Какие методы обработки относят к терморезанию?

20. От каких факторов зависит эффект воздействия на материал дополнительно подведенной энергии при терморезании?

21. В чем заключается сущность метода термомеханической обработки?

22. Какие технологические задачи решают, применяя метод термомеханической обработки?

23. При выполнении каких технологических операций можно применять метод термомеханической обработки?

24. С какой целью в зоне резания создают дополнительное поле напряжений?

25. Как решают проблему обеспечения качества отверстий при обработке ГKM?

26. С какой целью применяют сверла с периферийными подрезателями?

26. Какую задачу выполняют вспомогательные подрезающие кромки сверла при выводе инструмента из канала отверстия?

27. Как удастся избежать перерезания армирующих слоев ПКМ при наружной обработке резанием ответственных тяжело нагруженных изделий?

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Автоклав — герметичный аппарат, позволяющий проводить различные процессы (например, отверждение КМ при нагреве и под давлением выше атмосферного).

Адгезия — слипание (притяжение) разнородных твердых или жидких тел, соприкасающихся своими поверхностями; обусловлена молекулярным взаимодействием.

Анизотропия — зависимость физических и технологических свойств твердого тела от направления.

Волокна органические — волокна и нити из концентрированных арамидных полимеров, в которых цепочки вытянутых макромолекул расположены параллельно оси волокна; обладают высокой жесткостью и прочностью.

Гетерогенная система — неоднородная физико-химическая система, состоящая из различных по физическим свойствам или химическому составу частей (фаз). Одна фаза системы отделена от смежной с ней фазы поверхностью раздела, на которой скачком изменяется одно или несколько свойств.

Гибридный композиционный материал — материал, содержащий в своем составе три и более компонента.

Гидрорезание — технологический метод обработки материалов, основанный на использовании кинетической энергии тонкой сверхзвуковой струи жидкости (540...1400 м/с), истекающей под высоким давлением (до 1000 МПа) из специального сопла. При разрезании различных пластиков давление истечения струи принимают равным 200...500 МПа.

Графитизация — операция технологического процесса получения углеродных волокон и УУКМ, при которой армирующие волокна в результате высокотемпературной обработки в инертной среде при температуре 2870...3070 К приобретают графитную структуру.

Деструкция — разрушение структуры чего-либо, в том числе деструкция ПКМ.

Жгут — пучок крученых или некрученых нитей различной линейной плотности.

Карбонизация — операция технологического процесса получения углеродных волокон и УУКМ, при которой волокно и матрицу УУКМ обрабатывают в инертной среде при температуре 1200...1773 К; при этом из материала удаляются все элементы, кроме углерода.

Микрофибриллы (в технике) — тончайшие нитевидные структуры. Объединения микрофибрилл, расположенные параллельно друг другу вдоль одной оси, образуют длинные волокна — фибриллы. Разрушение волокон практически при всех видах механического нагружения обязательно проходит стадию межфибриллярного расщепления волокна с последующим обрывом отдельных продольно расположенных структурных элементов (микрофибрилл).

Обечайка — конический или цилиндрический барабан без днищ.

Обрабатываемость — технологическое свойство материала, характеризующее его способность подвергаться обработке разными технологическими методами (давлением, сваркой, резанием и др.).

Обработка осевая — лезвийная обработка с вращательным главным движением резания при постоянном радиусе его траектории и движении подачи только вдоль оси главного движения; осевую обработку осуществляют при сверлении, зенкеровании, развертывании, зенковании, цековании.

Отверждение — необратимый переход связующего в нерастворимый и неплавкий (так называемый сшитый) поли-

мер при изготовлении КМ; происходит с участием специальных реагентов (отвердителей) или под действием специально подведенной энергии (теплоты и др.).

Препрег — заготовка для изготовления изделий из ПКМ различными технологическими методами. Получают пропиткой наполнителя связующим веществом на специальном технологическом оборудовании. Свойствами составляющих компонентов и условиями хранения определяется длительность пригодности препрега.

Реактопласты — термореактивные пластмассы на основе отверждающихся олигомеров; переработка их в изделия сопровождается необратимой химической реакцией с образованием неплавкого и нерастворимого материала; КМ, которые отверждаются при нагреве.

Реновация — комплекс технологических, конструкторских и организационных мероприятий, направленных на увеличение рабочего ресурса реновируемого объекта или его составляющих, на использование его по новому назначению или на повторное использование материала и его утилизацию.

Ровинг — жгут, образованный пучками непрерывных нитей в виде некрученых жгутов или крученых нитей.

Термопласты — пластические массы, которые могут размягчаться при нагреве и застывать при охлаждении; способны к повторной переработке. Композиционные материалы, которые отверждаются при охлаждении.

Фрезерование круговое — фрезерование поверхности вращения.

Шпулярник — приспособление для установки на технологическом оборудовании необходимого количества бобин или шпуль с волокнистым материалом.

ЛИТЕРАТУРА

Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.

Машиностроение. Энциклопедия. Т. III-3: Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др. М.: Машиностроение, 2000. 840 с.

Сабельников В.В., Ярославцев В.М. Режимы резания неметаллических материалов: Учеб. пособие. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. 80 с.

Сарбаев Б.С., Сдобников А.Н., Сдобников С.А. Применение композиционных материалов с пьезоэлектрическими свойствами в интеллектуальных конструкциях аэрокосмической техники (обзор) // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. Спец. выпуск «Композиционные материалы, конструкции и технологии», 2005. С. 129–165.

Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. / Пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. 584 с.

Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение, 1987. 176 с.

Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. Спец. выпуск «Композиционные материалы, конструкции и технологии», 2005. С. 41–62.

**Рекомендуемые значения геометрических параметров
режущей части резцов для точения заготовок из стеклопластиков**

Обрабатываемый материал	Материал режущей части резцов	Геометрические параметры режущей части резцов, град				
		γ	α	φ	φ_1	r , мм
Стеклотекстолиты СТ, СТУ	ВК2, ВК3М	5	25	45	15	0,5 – 2,0
	АСБ, АСПК	–5	10	45	15 – 30	1,5 – 2,0
СТЭФ	ВК3М, ВК8	0 – 2	15 – 20	40 – 45	20	1,0 – 2,0
	АСБ, АСПК					
ФН	ВК2, ВК3М	10	10	45	15	0,5 – 2,0
СК-9Ф	ВК2, ВК3М	0	20	45	15	1,0 – 3,0
Стеклопластики						
АГ-4С, ЭФБ-П, ВФТ	ВК2, ВК3М	5,0 – 10,0	25	45	12	0,5 – 1,0
27-63 «С»	ВК2, ВК3М	5	25	45	15	0,5 – 4,0
33-18 «С»	ВК2	5,0 – 10,0	20 – 25	45	12	0,5 – 2,0
П-5-2	ВК2, ВК3М	10	20	40 – 45	20	1,0 – 2,0
Стекловолокниты						
АГ-4В	ВК2, ВК6	5	25	45	12	0,5 – 1,0
	ВК3М	10	25	45	45	0,5 – 1,0
	ВК6М	18	15	45	45	1,5 – 2,0
РТП-100, РТП-170	ВК2, ВК6М	5,0 – 10,0	20 – 25	45	12	0,5 – 2,0

Значения h_z , мм, резцов при точении (критерий затупления)

Материал режущей части резцов	Получистовое точение	Чистовое точение
P6M5	0,3 – 0,4	0,15 – 0,20
BK2, BK3M, BK8	0,3 – 0,6	0,15 – 0,25
АСБ, АСПК	0,2 – 0,3	0,10 – 0,14

Рекомендуемые значения подачи при точении стеклопластиков в зависимости от заданной шероховатости поверхности

Параметр шероховатости Ra , мкм	Марка инструментального материала	Подача S , мм/об, при радиусе вершины резца r , мм			
		До 0,5	0,5 – 1,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,0
1,25 – 2,50	Быстрорежущая сталь	0,03 – 0,05	0,04 – 0,07	0,05 – 0,09	—
2,5 – 5,0	P6M5, твердый сплав	0,09 – 0,12	0,10 – 0,16	0,12 – 0,18	0,14 – 0,20
Более 5,0	BK2, BK6, BK8	0,2 – 0,3	0,2 – 0,4	0,25 – 0,50	0,3 – 0,5
1,00 – 1,25	АСБ, АСПК	До 0,1	—	—	—
1,25 – 3,75		0,1 – 0,2	—	—	—
3,75 – 6,10		0,2 – 0,3	—	—	—
6,1 – 7,5		0,3 – 0,4	—	—	—

Режимы резания при точении стеклопластиков (ориентировочные)

Обрабатываемый материал	Марка инструментального материала	Параметры режима резания		
		v , м/с	S , мм/об	t , мм
Стекло-текстолиты				
СТ	ВК2	2,5 – 4,7	0,1 – 0,4	0,5 – 3,0
СТ	ВК3М, ВК6М	3,5 – 6,5	0,10 – 0,25	0,5 – 1,5
		2,0 – 3,5	0,25 – 0,50	2,0 – 5,0
СТ	ВК8	1,6 – 3,3	0,15 – 0,40	1,0 – 4,0
СТ	P6M5	1,0 – 2,7	0,10 – 0,25	0,5 – 2,5
СТ	A*	6,6 – 16,7	0,01 – 0,06	0,06 – 0,20
СТ	АСБ	4,0 – 5,6	0,1 – 0,4	0,5 – 3,0
СТ	АСПК	6,5 – 8,5	0,1 – 0,3	0,5 – 2,0
СТУ, СТЭФ	ВК8	2,3 – 7,5	0,10 – 0,25	0,5 – 2,5
СТУ, СТЭФ	P6M5	1,0 – 2,7	0,10 – 0,25	0,5 – 2,5
СТУ	A	8,3 – 20,0	0,01 – 0,06	0,06 – 0,20
СТУ	АСБ	8,3 – 20,0	0,01 – 0,06	0,05 – 2,50
СТЭФ	A	5,0 – 13,0	0,01 – 0,06	0,06 – 0,20
СТЭФ	A	5,0 – 13,0	0,01 – 0,06	0,05 – 2,50
ФН	ВК2	4,7 – 7,2	0,10 – 0,20	0,5 – 1,0
		2,9 – 5,3	0,15 – 0,40	1,0 – 3,0
СК-9Ф	ВК2	2,0 – 3,5	0,10 – 0,25	0,2 – 1,0
		1,3 – 2,0	0,2 – 0,4	1,0 – 3,0
КАСТ	ВК6, ВК8	1,5 – 2,5	0,06 – 0,20	0,5 – 4,0
Стеклопластики				
АГ-4С	ВК2	2,0 – 2,7	0,1 – 0,3	1,0 – 2,0
27-63 «С»	ВК2, ВК3	4,0 – 9,0	0,10 – 0,15	0,5 – 2,0
		1,3 – 3,6	0,2 – 0,4	1,0 – 3,0

Обрабатываемый материал	Марка инструментального материала	Параметры режима резания		
		v , м/с	S , мм/об	t , мм
Стеклопластики 33-18 «С» П-5-2	ВК2	3,3 – 3,8	0,21	1,5
		0,8 – 1,9	0,1 – 0,2	0,5 – 2,0
	ВК2	0,5 – 1,2	0,15 – 0,40	1,0 – 3,0
Стекловолокниты АГ-4В РТП-100, РТП-170	ВК2	2,2 – 3,2	0,1 – 0,2	0,5 – 2,0
		1,7 – 2,6	0,15 – 0,50	1,0 – 3,0
	ВК6М	1,8 – 3,6	0,1 – 0,2	0,3 – 2,0
		1,2 – 2,4	0,15 – 0,40	1,0 – 3,0
	ВК8	0,9 – 2,5	0,1 – 0,4	0,5 – 3,0
	ВК2	До 8,0	0,21	1,5 – 5,0

* А — природный алмаз.

Таблица П5

**Данные для расчета скорости резания v , м/с,
при точении стеклопластиков**

Обрабатываемый материал	Материал режущей части резцов	$v = C_v / (T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v})$			
		C_v	m	x_v	y_v
Стеклотекстолиты СТ	ВК2	7,93*	0,18	0,02	0,09
		3,12**	0,18	0,09	0,66
	ВК3М	8,73	0,36	0,20	0,45
	ВК6М	7,96	0,36	0,20	0,45
	ВК8	6,11	0,36	0,20	0,45

Обрабатываемый материал	Материал режущей части резцов	$v = C_v / (T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v})$			
		C_v	m	x_v	y_v
Стеклотекстолиты					
СТ	АСБ	2160	1,00	0,10	0,12
	АСПК	3250	1,00	0,10	0,12
ФН	ВК2	3,77	0,11	0,19	0,42
СК-9Ф	ВК2	3,48	0,25	0,22	0,29
Стеклопластики					
27-63 «С»	ВК2	3,00	0,35	0,32	1,00
П-5-2	ВК2	5,00	0,58	0,42	0,49
Стекловолокнит					
АГ-4В	ВК2	3,40	0,16	0,18	0,20
	ВК3М	6,75	0,44	0,20	0,45
	ВК6М	6,13	0,44	0,20	0,45
	ВК8	4,72	0,44	0,20	0,45

* При $S = 0,1 \dots 0,2$ мм/об; $t = 0,5 \dots 2,0$ мм.
 ** При $S = 0,21 \dots 0,40$ мм/об; $t = 1 \dots 4$ мм.

Таблица П6

Данные для расчета главной составляющей P_z силы резания, Н, при точении стеклопластиков

Обрабатываемый материал	Материал инструмента	$P_z = C_p t^{x_p} S^{y_p}$		
		C_p	x_p	y_p
Стеклотекстолиты				
СТ	ВК2, ВК3М	186	0,82	1,08
ФН	ВК2, ВК3М	161	0,87	0,84
СК-9Ф	ВК2, ВК3М	175	0,68	0,84
Стекловолокнит				
АГ-4В	ВК6, ВК6М	96	0,77	0,43

Режимы обработки стеклотекстолита СТ резцами с пластинами из твердого сплава ВК2

S, мм/об	$t = 0,5 \text{ мм}$			$t = 1 \text{ мм}$			$t = 2 \text{ мм}$			$t = 3 \text{ мм}$		
	$\nu, \text{ м/с}$	$P_z, \text{ Н}$	$N_3, \text{ кВт}$	$\nu, \text{ м/с}$	$P_z, \text{ Н}$	$N_3, \text{ кВт}$	$\nu, \text{ м/с}$	$P_z, \text{ Н}$	$N_3, \text{ кВт}$	$\nu, \text{ м/с}$	$P_z, \text{ Н}$	$N_3, \text{ кВт}$
0,10	4,7	8,8	0,04	4,7	15,5	0,07	—	—	—	—	—	—
0,12	4,7	10,7	0,05	4,6	18,8	0,09	—	—	—	—	—	—
0,15	4,6	13,6	0,06	4,5	24,0	0,11	—	—	—	—	—	—
0,20	4,5	18,5	0,08	4,4	32,7	0,14	4,0	57,7	0,23	3,9	80,5	0,31
0,25	—	—	—	3,7	41,6	0,15	3,5	73,4	0,26	3,4	102,0	0,35
0,30	—	—	—	3,3	50,7	0,17	3,1	39,4	0,28	3,0	125,0	0,38
0,35	—	—	—	3,0	59,9	0,18	2,8	106,0	0,30	2,7	147,0	0,40
0,40	—	—	—	2,7	69,1	0,19	2,6	122,0	0,32	2,5	170,0	0,43

Таблица П8

Режимы обработки стеклотекстолита СТ резцами с пластинами из твердых сплавов ВК3М, ВК6М, ВК8

S, мм/об	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	
0,10	6,48	5,64	5,20	4,91	4,53	4,28	4,09	
0,12	5,96	5,19	4,79	4,52	4,17	3,93	3,76	
0,15	5,40	4,70	4,33	4,09	3,77	3,56	3,41	
0,20	4,74	4,13	3,81	3,60	3,32	3,13	2,99	
0,25	4,29	3,73	3,44	3,25	3,00	2,83	2,70	
0,30	3,95	3,44	3,17	3,00	2,76	2,61	2,49	
0,35	3,69	3,21	2,96	2,80	2,58	2,43	2,33	
0,40	3,47	3,02	2,78	2,63	2,43	2,29	2,19	
0,50	3,14	2,73	2,52	2,38	2,19	2,07	1,98	
Примечание. Значения поправочного коэффициента $K_{\text{ви}}$ на скорость резания в зависимости от марки инструментального материала режущей части резца:								
Марка материала			ВК3М	ВК6М	ВК8			
$K_{\text{ви}}$			1	0,91	0,7			

Режимы обработки стеклотекстолита СТ резцами со вставками из АСПК

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм				S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм		
	0,5	1,0	2,0	3,0		0,5	1,0	2,0
0,10	8,5	7,9	7,4	7,1	0,25	7,6	7,1	6,6
0,12	8,3	7,8	7,2	7,0	0,30	7,5	7,0	6,5
0,15	8,1	7,6	7,1	6,8	0,35	7,3	6,8	6,4
0,20	7,8	7,3	6,8	6,5	0,40	7,2	6,7	6,3
Примечания: 1. Значения поправочного коэффициента K_{vT} на скорость резания в зависимости от периода стойкости резцов: T, мин 360 480 K_{vT} 1,5 1,13 2. Для резцов со вставками из АСБ значения скорости резания следует умножить на 0,66.								

Режимы обработки стеклотекстолита ФН резцами с пластинами из твердого сплава ВК2

S , мм/об	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт
	$t = 0,2$ мм			$t = 0,3$ мм			$t = 0,5$ мм			$t = 1,0$ мм		
0,10	8,6	5,7	0,05	7,9	8,2	0,06	7,2	12,7	0,09	6,3	23,3	0,15
0,12	7,9	6,7	0,05	7,4	9,5	0,07	6,7	14,8	0,10	5,8	27,1	0,16
0,15	7,2	8,1	0,06	6,7	11,5	0,08	6,1	17,9	0,11	5,3	32,7	0,17
	$t = 0,5$ мм			$t = 1,0$ мм			$t = 2,0$ мм			$t = 3,0$ мм		
0,20	5,4	22,8	0,12	4,7	41,7	0,20	4,1	76,1	0,31	3,8	108	0,41
0,25	4,9	27,5	0,13	4,3	50,2	0,22	3,8	91,8	0,35	3,5	131	0,46
0,30	4,5	32,0	0,14	4,0	58,6	0,23	3,5	107,0	0,37	3,2	152	0,49
0,35	4,3	36,5	0,16	3,7	66,7	0,25	3,3	122,0	0,40	3,0	173	0,52
0,40	4,0	40,8	0,16	3,5	74,6	0,26	3,1	136,0	0,42	2,9	194	0,56

Режимы обработки стеклотекстолита СК-9Ф резцами с пластинами из твердого сплава ВК2

S , мм/об	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт
	$t = 0,5$ мм			$t = 1,0$ мм			$t = 2,0$ мм			$t = 3,0$ мм		
0,10	3,5	8,5	0,03	3,2	11,2	0,04	2,8	15,8	0,04	2,4	25,3	0,06
0,12	3,3	9,9	0,03	3,0	13,0	0,04	2,7	18,4	0,05	2,3	29,5	0,07
0,15	3,1	11,9	0,04	2,8	15,7	0,04	2,5	22,1	0,06	2,2	35,6	0,08
	$t = 0,5$ мм			$t = 1,0$ мм			$t = 2,0$ мм			$t = 3,0$ мм		
0,20	2,3	28,2	0,06	2,0	45,3	0,09	1,7	72,4	0,12	1,6	95,5	0,15
0,25	2,2	34,0	0,07	1,9	54,6	0,10	1,6	87,4	0,14	1,5	115	0,17
0,30	2,1	39,6	0,08	1,8	63,7	0,11	1,5	102,0	0,15	1,4	134	0,19
0,35	2,0	45,1	0,09	1,7	72,5	0,12	1,5	116,0	0,17	1,3	153	0,20
0,40	1,9	50,5	0,10	1,6	81,1	0,13	1,4	130,0	0,18	1,3	171	0,22

**Режимы обработки стеклопластика 27-63 «С» резцами
с пластинами из твердого сплава ВК2**

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм			
	0,5	1,0	2,0	3,0
0,10	8,9	7,2	5,8	5,1
0,12	7,4	6,0	4,8	4,3
0,15	5,9	4,8	3,9	3,4
0,20	4,5	3,6	2,9	2,6
0,25	3,6	2,9	2,3	2,0
0,30	3,0	2,4	1,9	1,7
0,35	2,5	2,1	1,7	1,5
0,40	2,2	1,8	1,5	1,3

**Режимы обработки стеклопластика П-5-2 резцами
с пластинами из твердого сплава ВК2**

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм			
	0,5	1,0	2,0	3,0
0,10	1,9	1,5	1,1	0,9
0,12	1,8	1,3	1,0	0,8
0,15	1,6	1,2	0,9	0,8
0,20	1,4	1,0	0,8	0,7
0,25	1,2	0,9	0,7	0,6
0,30	1,1	0,8	0,6	0,5
0,35	1,1	0,8	0,6	0,5
0,40	1,0	0,7	0,5	0,5

**Режимы обработки стекловолокнита АГ-4В резцами
с пластинами из твердого сплава ВК2**

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм			
	0,5	1,0	2,0	3,0
0,10	3,2	2,8	2,5	2,3
0,12	3,1	2,7	2,4	2,2
0,15	2,9	2,6	2,3	2,1
0,20	2,8	2,4	2,2	2,0
0,25	2,6	2,3	2,1	1,9
0,30	2,5	2,3	2,0	1,8
0,35	2,5	2,2	1,9	1,8
0,40	2,4	2,1	1,9	1,7
0,45	2,3	2,1	1,8	1,7
0,50	2,3	2,0	1,8	1,7

Режимы обработки стекловолокниста АГ-4В резцами с пластинами из твердых сплавов ВК3М, ВК6М, ВК8

S , мм/об	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт	v , м/с	P_z , Н	N_3 , кВт
	$t = 0,2$ мм			$t = 0,3$ мм			$t = 0,5$ мм			$t = 1,0$ мм		
0,10	3,9	10,3	0,04	3,6	14,1	0,05	3,6	14,1	0,05	3,3	20,9	0,07
0,12	3,6	11,2	0,04	3,3	15,3	0,05	3,3	22,6	0,07	3,0	22,6	0,07
0,15	3,3	12,3	0,04	3,0	16,8	0,05	2,7	24,9	0,07	2,4	42,5	0,1
	$t = 0,2$ мм			$t = 0,3$ мм			$t = 0,5$ мм			$t = 1,0$ мм		
0,20	2,4	28,2	0,07	2,1	48,1	0,1	1,8	82,1	0,15	1,7	112	0,19
0,25	2,2	31	0,07	1,9	52,9	0,1	1,6	90,4	0,15	1,5	123	0,19
0,30	2,0	33,5	0,07	1,7	57,2	0,1	1,5	97,7	0,15	1,4	133	0,19
0,35	1,9	35,8	0,07	1,6	61,1	0,1	1,4	104,0	0,15	1,3	143	0,19
0,40	1,8	38	0,07	1,5	64,7	0,1	1,3	111,0	0,15	1,2	151	0,18

Примечание. Значения поправочного коэффициента $K_{\text{ви}}$ на скорость резания в зависимости от марки инструментального материала режущей части резца:

Марка материала		ВК3М	ВК6М	ВК8
$K_{\text{ви}}$		1,10	1,00	0,77

**Значения поправочного коэффициента K_{vT} на скорость резания
при точении стеклопластиков резцами с пластинами
из твердого сплава в зависимости от принятого периода
стойкости инструмента (к табл. П7, П8, П10 – П15)**

Номер таблицы	Поправочный коэффициент K_{vT} при периоде стойкости T , мин					
	15	30	60	90	120	180
П7	1,28	1,13	1	0,93	0,88	0,82
П8	1,65	1,28	1	0,86	0,78	0,67
П10	1,16	1,08	1	0,96	0,93	0,89
П11	1,42	1,19	1	0,91	0,84	0,76
П12	1,62	1,27	1	0,87	0,78	0,68
П13	2,24	1,49	1	0,79	0,67	0,53
П14	1,25	1,12	1	0,94	0,90	0,84
П15	1,84	1,36	1	0,84	0,74	0,62

**Рекомендуемые геометрические параметры спиральных сверл
для сверления заготовок из стеклопластиков**

Обрабатываемый материал	Материал режущей части сверл	Геометрические параметры спиральных сверл, град			
		2φ	γ	α	ω
Стекло- текстолиты					
	СТ	70 – 80	15	25	20
	СТЭФ	80 – 90	15	30	20
КАСТ	ВК8	70	10	25	—
Стекло- пластики					
	P6M5	60	15	20	10 – 15
	ВК6, ВК6М, ВК8	70	12	20	20
	СВАМ	70	15	30	—
	ВК6, ВК6М, ВК8	70	10	25	—

Обрабатываемый материал	Материал режущей части сверл	Геометрические параметры спиральных сверл, град			
		2φ	γ	α	ω
Стекловолокнит АГ-4В	Р6М5 ($D < 12$ мм)	85	—	20 – 24	8 – 15
	Р6М5 ($D > 12$ мм)	70	10 – 15	16	—
	ВК8	70	12	20	—

Таблица П18

Рекомендуемые значения подачи S при сверлении стеклопластиков в зависимости от заданного параметра шероховатости поверхности Ra

Ra , мкм	S , мм/об	Ra , мкм	S , мм/об
2,5 – 4,0	0,1 – 0,2	7,5 – 10	0,2 – 0,4
4,0 – 7,5	0,15 – 0,30	Более 10	0,3 – 0,8

Таблица П19

Режимы резания при сверлении стеклопластиков спиральными сверлами (ориентировочные)

Обрабатываемый материал	Марка инструментального материала	Параметры режима резания		
		v , м/с	S , мм/об	D , мм
Стеклотекстолиты	Р6М5	0,45 – 0,30	0,10 – 0,35	5,0 – 25,0
		0,25 – 0,33	0,25 – 0,60	5,0 – 25,0
	ВК8	1,9 – 2,7	0,10 – 0,25	5,0 – 25,0
		1,4 – 2,1	0,2 – 0,6	5,0 – 25,0
	ВК6М	1,9 – 3,2	0,1 – 0,4	5,0 – 25,0
	Т15К6	1,1 – 1,9	0,1 – 0,4	5,0 – 25,0

Обрабатываемый материал	Марка инструментального материала	Параметры режима резания		
		v , м/с	S , мм/об	D , мм
Стеклотекстолиты	СТЭФ	4,0 – 8,2	0,07 – 0,15	6,0 – 18,0
		2,0 – 4,0	0,15 – 0,30	6,0 – 18,0
	КАСТ	0,40 – 0,75	0,07 – 0,20	6,0 – 22,0
		0,26 – 0,40	0,20 – 0,40	6,0 – 22,0
	ЭФ 32-301	0,41 – 0,83	0,05 – 0,25	—
	ВСП-4	0,30 – 0,67	0,05 – 0,25	—
Стеклопластики	АГ-4С	0,30 – 0,42	0,06 – 0,20	5,0 – 9,0
		ВК6, ВК8	0,06 – 0,20	5,0 – 9,0
	П-5-2	0,16 – 0,33	0,05 – 0,40	—
	СВАМ	0,30 – 1,34	0,06 – 0,20	—
Стекловолокниты	АГ-4В	0,25 – 0,33	0,07 – 0,20	6,0 – 22,0
		0,21 – 0,27	0,15 – 0,40	6,0 – 22,0
	ВК6, ВК8	1,8 – 2,4	0,07 – 0,20	6,0 – 22,0
		1,0 – 2,0	0,15 – 0,40	6,0 – 22,0
	РТП-100, РТП-170	0,25 – 0,41	0,05 – 0,40	—

**Данные для расчета скорости резания v , м/с,
при сверлении стеклопластиков спиральными сверлами**

Обрабатываемый материал	Материал инструмента	$v = (C_v \cdot D^{x_v}) / (T^m \cdot S^{y_v})$			
		C_v	m	x_v	y_v
Стеклотекстолиты СТ СТЭФ КАСТ	P6M5	0,230	0,66	0,80	0,34
	BK8	3,050	0,90	0,90	0,37
	BK6, BK8	1,810	1,16	1,24	0,98
	P6M5	0,473	1,17	1,04	0,60
Стеклопластик АГ-4С	P6M5	0,226	0,56	0,63	0,32
	BK8	2,190	0,80	0,73	0,43
Стекловолокнит АГ-4В	P6M5	0,286	0,64	0,59	0,26
	BK8	3,466	0,71	0,60	0,26

**Режимы резания заготовок из стеклотекстолита СТ
спиральными сверлами из стали P6M5**

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при диаметре сверла D , мм						
	5	7	10	12	15	20	25
0,10	0,40	0,42	0,44	0,45	0,47	0,48	0,50
0,12	0,37	0,39	0,41	0,42	0,44	0,45	0,47
0,15	0,35	0,36	0,38	0,39	0,41	0,42	0,43
0,20	0,31	0,33	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39
0,25	0,29	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,37
0,30	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34
0,35	0,26	0,27	0,29	0,29	0,30	0,32	0,33
0,40	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31
0,50	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
0,60	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27

**Режимы резания заготовок из стеклотекстолита СТ
спиральными сверлами с пластинами из твердых сплавов
($D = 5...25$ мм)**

S , мм/об	v , м/с	S , мм/об	v , м/с	S , мм/об	v , м/с
0,10	2,7	0,20	2,1	0,35	1,7
0,12	2,5	0,25	1,9	0,40	1,6
0,15	2,3	0,30	1,8	0,60	1,4

Примечание. Значение поправочного коэффициента $K_{ви}$ на скорость резания в зависимости от марки инструментального материала режущей части сверла:

Марка материала	ВК6М	ВК4	ВК8	ВК10М	T15K6	T15K10
$K_{ви}$	1,2	1,1	1,0	0,4	0,7	0,6

**Режимы резания заготовок из стеклотекстолита СТЭФ
спиральными сверлами с пластинками из твердых сплавов ВК6, ВК8**

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при диаметре сверла D , мм						
	6	8	10	12	14	16	18
0,07	7,9	8,1	8,2	8,4	8,5	8,6	8,6
0,10	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,0	6,1
0,12	4,7	4,8	4,9	4,9	5,0	5,0	5,1
0,15	3,7	3,8	3,9	4,0	4,0	4,1	4,1
0,20	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1
0,25	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5
0,30	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1

**Режимы резания заготовок из стеклотекстолита КАСТ
спиральными сверлами из стали Р6М5**

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при диаметре сверла D , мм						
	6	8	10	12	14	16	18
0,07	0,82	0,79	0,77	0,75	0,74	0,71	0,69
0,10	0,66	0,64	0,62	0,61	0,59	0,57	0,56
0,12	0,59	0,57	0,56	0,54	0,53	0,52	0,50
0,15	0,52	0,50	0,49	0,47	0,47	0,45	0,44
0,20	0,44	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37
0,25	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32
0,30	0,34	0,33	0,32	0,31	0,31	0,30	0,29
0,35	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26
0,40	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25	0,24

**Режимы резания заготовок из стеклопластика АГ-4С
спиральными сверлами**

Материал режущей части сверла	S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при диаметре сверла D , мм		
		5	7	9
Быстрорежущая сталь Р6М5	0,06	0,42	0,43	0,44
	0,08	0,39	0,39	0,40
	0,10	0,36	0,37	0,37
	0,12	0,34	0,35	0,35
	0,15	0,32	0,32	0,33
	0,20	0,29	0,29	0,30
Пластины из твердого сплава ВК8	0,06	2,70	2,70	2,60
	0,08	2,40	2,40	2,30
	0,10	2,20	2,10	2,10
	0,12	2,00	2,00	1,90
	0,15	1,80	1,80	1,80
	0,20	1,60	1,60	1,60

**Режимы резания заготовок из стекловолокнита АГ-4В
спиральными сверлами из стали Р6М5**

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при диаметре сверла D , мм					
	6	8	10	12	14	22
0,07	0,34	0,33	0,33	0,32	0,32	0,31
0,10	0,31	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29
0,12	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27
0,15	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,25
0,20	0,26	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24
0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23
0,30	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22
0,35	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21
0,40	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20

**Режимы резания заготовок из стекловолокнита АГ-4В
спиральными сверлами с пластинами из твердого сплава ВК8**

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при диаметре сверла D , мм						
	6	8	10	12	14	18	22
0,07	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3
0,10	2,4	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1
0,12	2,3	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0
0,15	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9
0,20	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7
0,25	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6
0,30	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5
0,35	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5
0,40	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4

**Значения поправочного коэффициента K_{vT} на скорость резания
при сверлении стеклопластиков в зависимости
от принятого периода стойкости инструмента (к табл. П21 – П27)**

Номер таблицы	Поправочный коэффициент K_{vT} при T , мин (D , мм)						
	$0,5D$	D	$1,5D$	$2D$	$2,5D$	$3D$	$4D$
П21	2,50	1,58	1,21	1,00	0,86	0,76	—
П22	—	2,69	1,87	1,44	1,18	1,00	0,77
П23	—	3,57	2,23	1,60	1,23	1,00	0,71
П24	5,07	2,25	1,40	1,00	0,77	0,62	—
П25 (для стали Р6М5)	5,17	1,47	1,18	1,00	0,88	0,80	—
П25 (для сплава ВК8)	—	2,41	1,74	1,38	1,16	1,00	0,79
П26	2,43	1,56	1,20	1,00	0,87	0,77	—
П27	—	2,18	1,64	1,33	1,14	1,00	0,82

Таблица П29

**Основные геометрические параметры режущей части фрез
для обработки стеклопластиков**

Типы фрез	Материал режущей части (группа*)	Геометрические параметры режущей части фрез, град		
		γ	α	ω
Цилиндриче- ские	БС	10	20	30
	ТС	8 – 15	15	30
Торцовые	ТС	5 – 12	15 – 20	0 – 25
	АС	0 – 5	18	0
Концевые	ТС	10 – 15	20	40
Прорезные	ТС	5 – 10	20 – 22	10 – 15
Дисковые	ТС	8 – 12	20 – 25	15 – 20
* БС — быстрорежущая сталь; ТС — твердый сплав группы ВК; АС — алмаз синтетический.				

**Рекомендуемые значения подачи при фрезеровании стеклопластиков
в зависимости от заданной шероховатости поверхности**

Параметр шероховатости Ra , мкм, поверхности	Подача S_z , мм/зуб, при видах фрезерования	
	цилиндрическом фрезеровании прорезными фрезами	торцовом фрезеровании
1,25 – 2,50	До 0,03	До 0,03
2,5 – 5,0	0,03 – 0,10	0,03 – 0,06
5,0 – 10,0	0,10 – 0,25	0,06 – 0,15
10,0 – 16,0	0,25 – 0,35	0,15 – 0,25
16,0 – 20,0	0,35 – 0,55	0,25 – 0,50

**Режимы резания при фрезеровании стеклопластиков
(ориентировочные)**

Типы фрез	Обрабатыва- емый материал	Материал режущей части	Параметры режима резания		
			v , м/с	S_z , мм/зуб	t , мм
Ци- лин- дри- чес- кие	Стеклотек- столиты СТ	Р6М5	0,35 – 1,27	0,1 – 0,2	0,5 – 2
			0,16 – 0,63	0,15 – 0,14	1,0 – 3,0
	СТ	ВК4	5 – 10,8	0,1 – 0,2	0,5 – 1,5
			2,5 – 5,8	0,2 – 0,4	1,0 – 3,0
	КАСТ	ВК6, ВК8	5,8 – 8,3	0,05 – 0,1	1,0 – 2,0
			3,3 – 5,0	0,1 – 0,15	3,0 – 5,0
Тор- цо- вые	Стеклотек- столиты				
	СТ	Р6М5	1,66 – 5,0	0,01 – 0,6	—
	СТ	ВК4	1,6 – 10,0	0,01 – 0,6	—
	СТ	ВК6, ВК8	1,7 – 10,0	0,04 – 0,2	—

Типы фрез	Обрабатыва- емый материал	Материал режущей части	Параметры режима резания		
			v , м/с	S_z , мм/зуб	t , мм
Тор- цо- вые	Стеклотек- столины	ВК6, ВК8	0,83 – 6,70	0,04 – 0,15	—
	СТЭФ	АСБ	11,5 – 13,5	0,04 – 0,10	0,5–1,5 ($B^* = 50$ – 100 мм)
					1,0–2,5 ($B = 50$ – 100 мм)
					0,5 – 1,5 ($B = 130$ – 190 мм)
					1,0–2,5 ($B = 130$ – 190 мм)
					—
	Стекло- пластик	ВК6, ВК8	0,7 – 5,0	0,03 – 0,15	—
	Стекло- волокнит	Р6М5	0,5 – 0,7	0,1 – 0,2	—
		ВК4	3,3 – 5,0	0,1 – 0,2	—
		АСБ	2,2 – 4,0	0,04 – 0,10	0,5–2,0 ($B = 50$ – 100 мм)
					1,0–2,5 ($B = 50$ – 100 мм)
					0,5 – 2,0 ($B = 130$ – 190 мм)
					1,0 – 2,5 ($B = 130$ – 190 мм)

Типы фрез	Обрабатываемый материал	Материал режущей части	Параметры режима резания		
			v , м/с	S_z , мм/зуб	t , мм
Концевые	Стеклотекстолиты				
	СТ	P6M5	0,33 – 1,50	0,50 – 0,75	—
	ЭФ32-301	BK6, BK8	3,30 – 4,20	0,08 – 0,40	—
	ВСП-4	BK6, BK8	1,20 – 1,80	0,08 – 0,40	—
	Стеклопластики				
	АГ-4С	BK6, BK8	3,3 – 4,2	0,08 – 0,40	—
	П-5-2	BK6, BK8	1,8 – 2,3	0,08 – 0,40	—
	ЖСА, ЖСП	BK6, BK8	0,9 – 1,1	0,08 – 0,40	—
	Стекловолокниты				
	АГ-4В	BK6, BK8	3,30 – 4,20	0,08 – 0,40	—
	РТП-170	BK6, BK8	0,66 – 0,80	0,08 – 0,40	—
Дисковые	Стеклотекстолиты				
	СТ	BK6, BK8	3,00 – 14,00	0,06 – 0,15	—
	СТЭФ	BK6, BK8	4,20 – 13,00	0,05 – 0,12	—
	Стеклопластики				
	АГ-4С	BK6, BK8	2,50 – 9,20	0,02 – 0,06	—
	СВАМ	BK6, BK8	3,30 – 10,00	0,03 – 0,07	—
* B — ширина фрезерования, мм.					

**Данные для расчета скорости резания v , м/с,
при фрезеровании стеклопластиков**

Фрезерование цилиндрическими фрезами						
Обрабатываемый материал	Материал ре- жущей части фрезы	$v = C_v / (T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v})$				
		C_v	m	x_v	y_v	
Стеклотекстолит СТ	ВК4	7320	1,40	0,57	0,33	
	Р6М5	26,20	1,27	0,55	0,78	
Фрезерование торцовыми фрезами						
Обрабатываемый материал	Материал режущей части	$v = C_v / (T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^q)$				
		C_v	m	x_v	y_v	q
Стеклотекстолит СТЭФ	АСБ	$9,7 \cdot 10^{10}$	3,33	0,53	0,50	0,43
Стекловолокнит АГ-4В		$11,7 \cdot 10^{10}$	3,45	0,17	0,38	0,62

**Режимы резания стеклотекстолита СТ
цилиндрическими фрезами из стали Р6М5**

S_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с, при t , мм				S_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с, при t , мм			
	0,5	1,0	2,0	3,0		0,5	1,0	2,0	3,0
0,10	1,27	0,87	0,59	0,48	0,25	0,61	0,42	0,27	0,23
0,12	1,10	0,75	0,51	0,41	0,30	0,54	0,37	0,25	0,20
0,15	0,92	0,63	0,43	0,34	0,35	0,48	0,33	0,23	0,18
0,20	0,75	0,51	0,35	0,28	0,40	0,42	0,29	0,20	0,16

**Режимы резания стеклотекстолита СТ цилиндрическими фрезами
с пластинами из твердого сплава ВК4**

S_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с, при t , мм				S_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с, при t , мм			
	0,5	1,0	2,0	3,0		0,5	1,0	2,0	3,0
0,10	10,79	7,27	4,90	3,89	0,25	7,97	5,37	3,62	2,87
0,12	10,15	6,84	4,61	3,66	0,30	7,51	5,06	3,41	2,71
0,15	9,44	6,36	4,28	3,40	0,35	7,14	4,81	3,24	2,57
0,20	8,58	5,78	3,89	3,09	0,40	6,83	4,60	3,10	2,46

**Режимы резания стеклопластика СТЭФ торцовыми фрезами,
оснащенными вставками из синтетического алмаза АСБ**

B , мм	S_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
50	0,08	13,5				12,0
	0,10				12,1	10,8
	0,15			11,5	9,9	8,8
	0,20			12,3	9,9	8,5
	0,25			11,0	8,9	7,6
65	0,06	13,5				12,3
	0,08				12,1	10,7
	0,10			12,6	10,8	9,6
	0,15			12,7	10,2	8,8
	0,20			11,0	8,8	7,6
	0,25			9,8	7,9	6,8
80	0,06	13,5			12,7	11,3
	0,08			12,8	11,0	9,8
	0,10			11,5	9,9	8,8
	0,15			11,7	9,4	8,1
	0,20			10,0	8,1	6,9
	0,25	12,9	9,0	7,3	6,2	5,6

B , мм	S_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
100	0,04	13,5				12,6
	0,06				11,6	10,2
	0,08			11,6	10,0	8,9
	0,10			13,0	10,5	9,0
	0,15			10,6	8,5	7,3
	0,20	13,1	9,1	7,3	6,3	5,6
	0,25	11,7	8,2	6,6	5,6	5,0
130	0,04	13,5			12,7	11,3
	0,06			12,1	10,3	9,1
	0,08			12,9	10,4	9,0
	0,10			11,6	9,3	8,0
	0,15			9,5	7,6	6,6
	0,20	11,7	8,2	6,6	5,6	5,0
	0,25	10,4	7,3	5,9	5,0	4,5
160	0,04	13,5			11,6	10,3
	0,06			11,0	9,5	8,4
	0,08			11,8	9,5	8,2
	0,10			10,6	8,5	7,3
	0,15	12,5	8,7	7	6	5,3
	0,20	10,7	7,5	6	5,2	4,6
	0,25	9,6	6,7	5,4	4,6	4,1
190	0,04	13,5		12,6	10,8	9,6
	0,06		12,7	10,2	8,8	7,8
	0,08		11,0	8,8	7,6	6,8
	0,10		9,9	7,9	6,8	6,1
	0,15	11,6	8,1	6,5	5,6	5,0
	0,20	10,0	6,9	5,6	4,8	4,3
	0,25	8,9	6,2	5,0	4,3	3,8

**Режимы резания стекловолокнита АГ-4В торцовыми фрезами,
оснащенными вставками из синтетического алмаза АСБ**

B , мм	S_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
50	0,04	5,5	4,9	4,6	4,4	4,2
	0,06	4,7	4,2	3,9	3,7	3,6
	0,08	4,2	3,7	3,5	3,3	3,2
	0,10	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9
	0,15	3,4	3,0	2,8	2,7	2,6
	0,20	2,9	2,6	2,4	2,3	2,2
	0,25	2,7	2,4	2,2	2,1	2,1
65	0,04	4,7	4,2	3,9	3,7	3,6
	0,06	4,0	3,6	3,3	3,1	3,1
	0,08	3,6	3,1	3,0	2,8	2,7
	0,10	3,2	2,9	2,7	2,5	2,5
	0,15	2,9	2,5	2,4	2,3	2,2
	0,20	2,5	2,2	2,0	2,0	1,9
	0,25	2,3	2,0	1,9	1,8	1,8
80	0,04	4,1	3,7	3,4	3,3	3,1
	0,06	3,5	3,1	2,9	2,8	2,7
	0,08	3,1	2,8	2,6	2,5	2,4
	0,10	2,8	2,5	2,4	2,2	2,2
	0,15	2,5	2,2	2,1	2,0	1,9
	0,20	2,2	1,9	1,8	1,7	1,6
	0,25	2,0	1,8	1,6	1,6	1,6
100	0,04	3,6	3,2	3	2,9	2,7
	0,06	3,1	2,7	2,5	2,4	2,3
	0,08	2,7	2,4	2,3	2,1	2,1
	0,10	2,5	2,2	2,1	2,0	1,9
	0,15	2,2	2,0	1,8	1,8	1,7
	0,20	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
	0,25	1,8	1,6	1,4	1,4	1,4
130	0,04	3,0	2,7	2,5	2,4	2,3
	0,06	2,6	2,3	2,2	2,0	2,0
	0,08	2,3	2,0	1,9	1,8	1,8
	0,10	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6
	0,15	1,9	1,7	1,5	1,5	1,4

B , мм	S_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
130	0,20	1,6	1,4	1,3	1,3	1,2
	0,25	1,5	1,3	1,2	1,2	1,2
160	0,04	2,7	2,4	2,2	2,1	2,0
	0,06	2,3	2,0	1,9	1,8	1,7
	0,08	2,0	1,8	1,7	1,6	1,6
	0,10	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4
	0,15	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3
	0,20	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1
	0,25	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0
190	0,04	2,4	2,1	2,0	1,9	1,8
	0,06	2,1	1,8	1,7	1,6	1,6
	0,08	1,8	1,6	1,5	1,4	1,4
	0,10	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3
	0,15	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1
	0,20	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0
	0,25	1,2	1,0	1,0	0,9	0,9

Таблица П37

Значения поправочного коэффициента K_{vT} на скорость резания при фрезеровании стеклопластиков в зависимости от принятого периода стойкости инструмента (к табл. П33–П36)

Номер таблицы	Поправочный коэффициент K_{vT} при T , мин								
	30	60	90	150	240	360	480	720	1080
П33	2,41	1,00	0,60	0,31	—	—	—	—	—
П34	—	6,96	3,95	1,93	1,00	0,57	0,38	0,21	—
П35	—	—	—	—	—	—	3,86	1,00	0,26
П36	—	—	—	—	—	—	4,05	1,00	0,25

Рекомендуемые геометрические параметры режущей части резцов для наружного точения

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	γ	α	φ	φ_1	λ	r , мм	$l_{\text{пер}}^*$, мм
Углепластик	ВК2, ВК3М, ВК4, ВК6М, ВК8	15	25 – 30	45	15 – 45	0	1	—
	АСПК	20	0 – 2	45	20	0	—	0,2 – 0,6
Органопластик, расположение волокон: однонаправленное	Р9, Р12, Р6М5, Т15К6,	10	20	45	45	0	2	—
	ВК8, ВК4, ВК2, ВК3М	15	32	45	45	0	2	—
Боропластик	СТМ	–3	20	40	12	0	—	—

* $l_{\text{пер}}$ — длина прямолинейной переходной кромки вершины лезвия, мм.

Значения h_z , мм, резцов при точении (критерий износа)

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	Черновое точение	Чистовое точение
Углепластик	Твердый сплав ВК8 и др.	0,30 – 0,40	0,15 – 0,20
	АСПК, АСБ	0,20 – 0,30	0,10 – 0,14
Органо-пластик	Твердый сплав ВК8 и др. Быстрорежущая сталь P12, P6M5 и др.	0,20 – 0,25	0,10
Боропластик	СТМ (эльбор-Р, БПА-28, БПА-15В и др.)	0,60 – 0,80	0,20 – 0,40

Таблица П40

Рекомендуемые значения подачи при точении угле- и органопластиков в зависимости от заданной шероховатости поверхности

Обрабатыва- емый материал	Глубина резания t , мм	Подача S , мм/об				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Углепластик	До 1,0 1,0 – 2,0 2,0 – 3,0 3,0 – 4,0 4,0 – 5,0	Ra , мкм				
		4,3	6,6	8,8	12,4	13,5
		3,7	5,7	7,7	10,0	11,7
		3,5	5,3	7,1	9,0	10,6
		3,2	5	6,7	8,7	9,9
		3,0	4,8	6,5	8,2	9,4
		Rz , мкм				
		14,9	24,6	32,9	40,5	47,5
		13,8	22,7	30,4	37,5	44,0
		12,5	20,6	27,6	34,0	39,9
		11,8	19,4	25,9	31,9	37,4
		11,2	18,5	24,7	30,4	35,7
	2,0 – 3,0 3,0 – 4,0 4,0 – 5,0	12,5	20,6	27,6	34,0	39,9
	11,8	19,4	25,9	31,9	37,4	
11,2	18,5	24,7	30,4	35,7		

Обрабатываемый материал	Глубина резания t , мм	Подача S , мм/об				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Органопластик		Ra , мкм				
	До 0,1	7,6	11,4	14,5	17,2	82,8
	1,0 – 2,0	6,8	10,2	13,0	15,4	72,4
	2,0 – 3,0	5,9	8,9	11,3	13,4	61,2
	3,0 – 4,0	5,4	8,1	10,3	12,3	54,7
	4,0 – 5,0	5,1	7,6	9,7	11,4	50,4
		Rz , мкм				
	До 1	40,1	54,8	65,8	74,8	138
	1,0 – 2,0	35,1	47,9	57,5	65,5	118,8
	2,0 – 3,0	29,6	40,5	48,6	55,3	98,3
	3,0 – 4,0	26,5	36,2	43,5	49,5	86,8
	4,0 – 5,0	24,4	33,4	40,0	45,6	79,1

Таблица П41

Значения поправочных коэффициентов на параметры Ra и Rz шероховатости поверхности при точении (к табл. П40)

Обрабатываемый материал	Поправочные коэффициенты на параметры Ra и Rz					
Углепластик	B зависимости от скорости резания v , м/с					
	v , м/с	0,67	1,17	1,67	2,33	2,83
	K_{Rav}	1,10	1,00	0,94	0,88	0,85
	K_{Rzv}	1,09	1,00	0,95	0,90	0,87
	B зависимости от износа инструмента h_3 , мм					
	h_3 , мм	0	0,05	0,10	0,15	0,20
	K_{Rah}	1,00	0,80	0,96	1,32	1,36
	K_{Rzh}	1,00	0,71	0,92	1,57	1,25

Обрабатываемый материал	Поправочные коэффициенты на параметры Ra и Rz					
Органопластик	<i>В зависимости от скорости резания v, м/с</i>					
	v , м/с	1,25	1,67	2	2,50	2,83
	K_{Rav}	1,52	1,18	1	0,82	0,74
	K_{Rzv}	1,40	1,14	1	0,85	0,78
	<i>В зависимости от износа инструмента h_3, мм</i>					
	h_3 , мм	0		0,05		0,10
	K_{Rah}	1		1,24		1,09
	K_{Rzh}	1		1,27		1,11

Таблица П42

Режимы точения угле- и органопластиков

S , об/мм	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм							
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
<i>Углепластик, твердый сплав</i>								
0,1	1,29	1,00	0,85	0,78	0,71	0,65	0,59	—
0,2	1,00	0,78	0,66	0,59	0,54	0,50	0,46	—
0,3	0,85	0,66	0,56	0,50	0,46	0,44	0,40	—
0,4	0,78	0,60	0,53	0,46	0,41	0,40	0,35	—
<i>Углепластик, СТМ</i>								
0,1	6,38	5,95	—	—	—	—	—	—
0,2	5,78	5,48	—	—	—	—	—	—
0,3	5,58	5,22	—	—	—	—	—	—
0,4	5,40	5,03	—	—	—	—	—	—
<i>Органопластик, быстрорежущая сталь</i>								
0,1	2,33	2,16	2,07	2,02	1,96	1,93	1,89	1,84
0,2	2,06	1,92	1,82	1,77	1,72	1,69	1,66	1,62
0,3	1,93	1,79	1,71	1,66	1,62	1,59	1,55	1,52
0,4	1,82	1,69	1,61	1,56	1,52	1,49	1,45	1,43
0,5	1,76	1,63	1,55	1,51	1,47	1,44	1,41	1,38

S , об/мм	Скорость резания v , м/с, при глубине резания t , мм							
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
<i>Органопластик, твердый сплав</i>								
0,1	2,62	2,53	2,48	2,45	2,42	2,38	2,37	2,35
0,2	2,30	2,23	2,18	2,15	2,12	2,10	2,08	2,07
0,3	2,13	2,07	2,02	2,00	1,97	1,95	1,93	1,92
0,4	2,03	1,97	1,93	1,90	1,87	1,85	1,83	1,82
0,5	1,97	1,90	1,86	1,84	1,82	1,80	1,77	1,76

Таблица П43

Значения поправочных коэффициентов на скорость резания v , м/с, при точении (к табл. П42)

Обрабатываемый материал, инструментальный материал	Поправочные коэффициенты на скорость резания								
Углепластик, твердый сплав	В зависимости от марки инструментального материала								
	Марка	T15K6		BK8		BK4		BK2	BK3M
	$K_{ви}$	0,58		1,00		1,16		1,52	1,76
	В зависимости от периода стойкости инструмента								
	T , мин	15		30		60		90	
	K_{vT}	1,97		1,40		1,00		0,82	
	В зависимости от типа резца								
	Тип резца	Проходной с углом ϕ , град				Под-резной	Отрезной	Рас-точной	
		30	45	60	90				
	K_{vp}	0,95	1,00	0,85	0,70	0,83	0,75	0,90	

Обрабатываемый материал, инструментальный материал	Поправочные коэффициенты на скорость резания						
Углепластик, СТМ	<i>В зависимости от инструментального материала и периода стойкости</i>						
	Инструментальный материал	Поправочный коэффициент K_{vT} при периоде стойкости T , мин					
		360	480	540	720	1440	1620
	АСБ	1,33	1,00	—	0,67	0,33	—
	АСПК	—	—	1,33	1,00	0,50	0,44
Органопластик, быстрорежущая сталь	<i>В зависимости от марки инструментального материала</i>						
	Марка	P9	P6M5	P12	P6M5K5		
	$K_{ви}$	0,92	0,91	1,00	1,06		
	<i>В зависимости от периода стойкости</i>						
	T , мин	5	10	15	20	30	45
	K_{vT}	1,42	1,14	1,00	0,91	0,80	0,70
Органопластик, твердый сплав	<i>В зависимости от марки инструментального материала</i>						
	Марка	T15K6	BK8	BK4	BK2	BK3M	
	$K_{ви}$	0,71	1,00	1,08	1,28	1,31	
	<i>В зависимости от периода стойкости</i>						
	T , мин	30	45	60	90	120	150
	K_{vT}	1,24	1,09	1,00	0,88	0,81	0,75

**Рекомендуемые геометрические параметры
спиральных сверл и значения h_z (критерий износа инструмента)**

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	Геометрические параметры сверл, град			h_z , мм
		2φ	γ	α	
Углеродистый	Р6М3, Р6М5, Р9, Р12	90 – 100	10,0 – 15,0	15 – 20	0,10 – 0,15
	ВК2, ВК3М, ВК6, ВК8	90 – 100	10	15 – 20	
Боролите	ВК2, ВК3М, ВК6, ВК8	105	10	20	0,25 – 0,30

Таблица П45

Высота микронеровностей R_z , мкм, при сверлении

S , мм/об	Диаметр сверла D , мм							
	4	8	10	12	14	16	18	20
<i>Углеродистый</i>								
0,1	—	—	18,8	22,3	25,8	29,2	32,7	36,2
0,2	—	—	23,9	27,4	30,9	34,3	37,8	41,3
0,3	—	—	28,9	32,4	35,9	39,3	42,8	46,3
0,4	—	—	34,0	37,5	41,0	44,4	47,9	51,4
<i>Боролите</i>								
0,05	25,3	31,0	33,0	34,9	36,5	37,9	—	40,3
0,10	26,5	32,5	34,6	36,6	38,2	39,6	—	42,2
0,20	28,5	34,9	37,2	39,4	41,1	42,7	—	45,4
0,30	30,4	37,3	39,7	42,0	43,9	45,5	—	48,5

**Значения поправочного коэффициента на параметр R_z
в зависимости от скорости резания (к табл. П45)**

Обрабатываемый материал	v , м/с	K_{Rzv}	Обрабатываемый материал	v , м/с	K_{Rzv}
Углепластик	0,17	1,85	Боропластик	0,083	0,84
	0,33	1,28		0,170	0,94
	0,50	1,13		0,250	1,00
	0,67	1,00		0,420	1,09
	1,00	0,72		0,670	1,17
	1,33	0,43		1,000	1,25

Режимы сверления угле- и боропластиков спиральными сверлами

S , мм/об	Скорость резания v , м/с, при диаметре сверла D , мм								
	4	6	8	10	12	14	16	20	
<i>Углепластик, твердосплавные сверла</i>									
0,1	—	—	0,87	0,89	0,90	0,91	0,92	0,94	
0,2	0,43	0,45	0,46	0,47	0,47	0,48	0,49	0,49	
0,3	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34	
0,4	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	
<i>Углепластик, быстрорежущие сверла</i>									
0,1	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	
0,2	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	
0,3	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	
0,4	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	
<i>Боропластик, твердосплавные сверла</i>									
0,05	0,09	0,12	0,14	0,17	0,20	0,23	0,25	0,30	
0,10	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,23	
0,20	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13	0,15	0,18	
0,30	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15	

**Значения поправочных коэффициентов на скорость резания
при сверлении (к табл. П47)**

Обрабатываемый материал, материал сверла	Поправочные коэффициенты на скорость резания						
Углепластик, твердый сплав	В зависимости от марки инструментального материала						
	Марка	BK8		BK4		BK2	
	$K_{\text{ви}}$	1,00		1,55		2,00	
	В зависимости от периода стойкости T , мин						
	T , мин	30	45	60	75	90	120
	K_{vT}	2,46	1,45	1,00	0,75	0,59	0,41
	В зависимости от глубины сверления l , мм						
	l , мм	1D		2D		3D	
	K_{vl}	1,11		1,06		1,00	
Углепластик, быстрорежущая сталь	В зависимости от марки инструментального материала						
	Марка	P9	P6M3 P6M5 P9Ф5K5	P12	P9Ф5K5	P18	
	$K_{\text{ви}}$	0,88	1,00	1,09	1,16	1,40	
	В зависимости от периода стойкости T , мин						
	T , мин	2	3	5	7,5	10	15
	K_{vT}	1,73	1,36	1,00	0,78	0,66	0,52
	В зависимости от глубины сверления l , мм						
	l , мм	1D		2D		3D	
	K_{vl}	1,32		1,18		1,00	
Боропластик, твердый сплав	В зависимости от периода стойкости						
	T , мин	0,5	0,75	1	1,25	1,5	
	K_{vT}	1,60	1,22	1,00	0,86	0,76	
	В зависимости от глубины сверления l , мм						
	l , мм	1D		2D		3D	
	K_{vl}	1,04		1,00		0,96	

**Рекомендуемые геометрические параметры режущей части фрез
для обработки углепластиков**

Материал режущей части	Тип фрезы	Геометрические параметры режущей части фрез, град						
		γ	α	α_1	φ	φ_1	ω	r , мм
ВК2, ВК3М	Дис- ковая	5 – 8	18 – 20	8	90	3	15	—
ВК4, ВК6	Тор- цовая	5 – 8	18 – 20	16 – 18	45	10 – 15	10	—
ВК6М, ВК8	Кон- цевая	10 – 15	20	16 – 18	90	10 – 15	40	—
АСБ (встав- ки)	Тор- цовая	0 – 5	18	18	45	15	—	1,5 – 2,0

**Рекомендуемые значения подачи
при различных видах фрезерования углепластиков
в зависимости от заданной шероховатости поверхности**

Параметр шерохова- тости Ra , мкм, поверхности	Подача S_z , мм/зуб, при	
	дисковом фрезеровании	торцовом фрезеровании
1,25 – 2,50	До 0,03	До 0,03
2,5 – 5,0	0,03 – 0,10	0,03 – 0,06
5 – 10	0,10 – 0,25	0,06 – 0,15
10 – 16	0,25 – 0,35	0,15 – 0,25
16 – 20	0,35 – 0,55	0,25 – 0,50

Режимы фрезерования углепластиков

Диаметр фрезы D , мм	Число зубьев фрезы z	Глубина резания t , мм	Скорость резания v , м/с, при подаче S_z , мм/зуб								
			0,03	0,04	0,06	0,10	0,15	0,25	0,40	0,60	
Фрезы дисковые, твердый сплав											
200	16	До 5	5,48	5,28	5,02	4,70	4,45	4,17	3,92	3,72	
		5 – 10	4,82	4,65	4,40	4,12	3,90	3,65	3,43	3,27	
		10 – 15	4,47	4,30	4,07	3,82	3,62	3,38	3,18	3,03	
		15 – 20	4,22	4,07	3,85	3,60	3,42	3,20	3,02	2,85	
		20 – 30	3,92	3,77	3,57	3,33	3,18	2,97	2,80	2,65	
		30 – 40	3,70	3,57	3,38	3,17	3,00	2,82	2,65	2,50	
250	24	До 5	5,55	5,35	5,08	4,75	4,50	4,22	3,97	3,77	
		5 – 10	4,96	4,70	4,45	4,17	3,95	3,70	3,48	3,30	
		10 – 15	4,52	4,35	4,12	3,85	3,65	3,42	3,22	3,05	
		15 – 20	4,27	4,12	3,90	3,65	3,47	3,23	3,05	2,90	
		20 – 30	3,95	3,82	3,62	3,38	3,20	3,00	2,82	2,68	
		30 – 40	3,75	3,60	3,42	3,20	3,03	2,85	2,68	2,53	
315	30	До 5	5,62	5,42	5,13	4,80	4,55	4,27	4,02	3,80	
		5 – 10	4,93	4,75	4,50	4,20	3,98	3,75	3,52	3,35	
		10 – 15	4,57	4,40	4,17	3,90	3,70	3,47	3,27	3,10	
		15 – 20	4,32	4,17	3,95	3,68	3,50	3,28	3,08	2,93	
		20 – 30	4,00	3,85	3,65	3,42	3,25	3,03	2,85	2,72	
		30 – 40	3,78	3,65	3,47	3,25	3,08	2,88	2,70	2,57	

Диаметр фрезы D , мм	Число зубьев фрезы z	Глубина резания t , мм	Скорость резания v , м/с, при подаче S_z , мм/зуб							
			0,03	0,04	0,06	0,10	0,15	0,25	0,40	0,60
Фрезы торцовые, твердый сплав										
100	8	До 2	7,42	7,15	6,78	6,35	6,01	5,63	5,30	5,03
		2 – 4	5,55	5,35	5,08	4,75	4,52	4,22	3,97	3,77
		4 – 6	4,68	4,52	4,28	4,02	3,80	3,57	3,35	3,18
		6 – 8	4,15	4,00	3,80	3,55	3,37	3,15	2,97	2,82
		8 – 10	3,78	3,65	3,45	3,23	3,07	2,88	2,70	2,57
125	8	До 2	7,90	7,62	7,23	6,77	6,42	6,00	5,65	5,35
		2 – 4	5,92	5,70	5,42	5,07	4,80	4,50	4,23	4,02
		4 – 6	4,98	4,80	4,57	4,27	4,05	3,78	3,57	3,38
		6 – 8	4,42	4,27	4,05	3,78	3,60	3,37	3,15	3,00
		8 – 10	4,03	3,88	3,67	3,43	3,27	3,05	2,88	2,73
160	10	До 2	8,47	8,17	7,73	7,23	6,87	6,43	6,05	5,73
		2 – 4	6,33	6,10	5,78	5,42	5,13	4,80	4,52	4,28
		4 – 6	5,35	5,15	4,88	4,57	4,33	4,07	3,82	3,62
		6 – 8	4,73	4,57	4,33	4,05	3,85	3,60	3,38	3,22
		8 – 10	4,32	4,15	3,95	3,68	3,50	3,27	3,08	2,92

Диаметр фрезы D , мм	Число зубьев фрезы z	Глубина резания t , мм	Скорость резания v , м/с, при подаче S_z , мм/зуб							
			0,03	0,04	0,06	0,1	0,15	0,25	0,4	0,6
200	12	До 2	9,02	8,68	8,23	7,72	7,32	6,85	6,43	6,12
		2 – 4	6,75	6,50	6,17	5,77	5,48	5,12	4,82	4,57
		4 – 6	5,68	5,48	5,18	4,87	4,60	4,30	4,07	3,85
		6 – 8	5,03	4,85	4,60	4,32	4,08	3,82	3,60	3,42
		8 – 10	4,58	4,42	4,20	3,93	3,73	3,48	3,28	3,12
250	14	До 2	9,60	9,25	8,77	8,22	7,78	7,28	6,85	6,5
		2 – 4	7,18	6,92	6,57	6,13	5,83	5,45	5,13	4,87
		4 – 6	6,05	5,83	5,53	5,17	4,92	4,60	4,32	4,10
		6 – 8	6,37	5,17	4,90	4,58	4,35	4,07	3,83	3,63
		8 – 10	4,88	4,70	4,47	4,18	3,97	3,72	3,48	3,32
Фрезы торцовые, АСБ										
63	6	1,0	23,3	19,0	14,3	9,9	7,4	5,2	3,7	2,8
		1,5	21,8	17,8	13,3	9,3	6,9	4,8	3,5	2,6
		2,0	20,8	17,0	12,7	8,9	6,7	4,6	3,3	2,5
100	8	1,0	16,1	13,1	9,9	6,8	5,1	3,6	2,5	1,9
		1,5	15,0	12,3	9,2	6,4	4,8	3,3	2,4	1,8
		2,0	14,3	11,7	8,8	6,1	4,6	3,2	2,3	1,7

Диаметр фрезы D , мм	Число зубьев фрезы z	Глубина резания t , мм	Скорость резания v , м/с, при подаче S_z , мм/зуб							
			0,03	0,04	0,06	0,10	0,15	0,25	0,40	0,6
125	8	1,0	13,4	10,9	8,2	5,7	4,3	2,9	2,1	1,6
		1,5	12,6	10,3	7,7	5,4	4,0	2,8	2,0	1,5
		2,0	12,0	9,8	7,4	5,1	3,8	2,7	1,9	1,4
160	10	1,0	11,3	9,2	6,9	4,8	3,6	2,5	1,7	1,3
		1,5	10,6	8,7	6,4	4,5	3,4	2,3	1,7	1,3
		2,0	10,1	8,2	6,2	4,3	3,2	2,2	1,6	1,2
200	14	1,0	9,3	7,6	5,7	3,9	2,9	2,1	1,5	1,1
		1,5	8,7	7,1	5,3	3,7	2,8	1,9	1,4	1,0
		2,0	8,3	6,8	5,1	3,5	2,6	1,8	1,3	0,9

Значения поправочных коэффициентов на скорость резания при фрезеровании углепластиков (к табл. П51)

Инструментальный материал	Поправочный коэффициент на скорость резания							
Твердый сплав	<i>В зависимости от марки инструментального материала</i>							
	Марка	BK2		BK4		BK6		BK8
	$K_{ви}$	1,25		1,00		0,80		0,60
	<i>В зависимости от периода стойкости фрезы T, мин</i>							
	Вид фрезерования	Поправочный коэффициент K_{vT} при T , мин						
		240	300	360	420			
	Дисковое	1,0	0,89	0,82	0,75			
Торцовое	1,0	0,89	0,81	0,75				
АСБ	<i>В зависимости от периода стойкости T, мин</i>							
	T , мин	720	960	1200	1440	1680		
	K_{vT}	1,00	0,47	0,26	0,16	0,11		
	<i>В зависимости от относительной ширины фрезерования B/D*</i>							
	B/D	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
	K_{vB}	1,00	1,10	1,26	1,45	1,73	2,17	2,99

* B — ширина фрезерования; D — диаметр фрезы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Основные сокращения и условные обозначения	5
Введение	7
1. Общие сведения о композиционных материалах.....	9
Контрольные вопросы	12
2. Технологические методы получения заготовок изделий из полимерных композиционных материалов.....	13
2.1. Формообразование намоткой	13
2.2. Формообразование прессованием в формах	20
2.3. Методы формообразования с использованием эластичной диафрагмы	23
2.4. Формообразование методом пултрузии.....	27
Контрольные вопросы	29
3. Обработка заготовок и Восстановление изделий из полимерных композиционных материалов.....	32
3.1. Особенности свойств полимерных композиционных материалов и их влияние на процесс резания.....	33
3.2. Обрабатываемость резанием полимерных композиционных материалов	39
3.3. Выбор рациональных режимов резания полимерных композиционных материалов при механической обработке резанием.....	42
3.4. Реновация изделий из полимерных композиционных материалов	53
Контрольные вопросы	57
4. Физические основы обработки резанием полимерных композиционных материалов.....	59
4.1. Процесс образования стружки при резании полимерных композиционных материалов с волокнистыми наполнителями	59
4.2. Аналитическое определение силы резания при обработке полимерных композиционных материалов	67
4.3. Перспективные методы исследования физики резания полимерных композиционных материалов	83
Контрольные вопросы	92
5. Инновационные технологии обработки композиционных материалов.....	94
5.1. Высокоэффективные методы и средства обработки полимерных композиционных материалов	95
5.2. Технологические проблемы и примеры их решения. Практические рекомендации.....	114
Контрольные вопросы	132
Словарь терминов.....	134
Литература.....	137

Учебное издание

Ярославцев Виктор Михайлович

**ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ
ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Редактор *Е.К. Кошелева*

Корректор *Р.В. Царева*

Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Подписано в печать 27.02.2011. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 10,70. Изд. № 112. Тираж 200 экз. Заказ .

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.