

На правах рукописи

ВЕРЕЗУБ Николай Владимирович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

Специальность 05.03.01 - Процессы механической
обработки, станки и
инструмент

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ВЕРЕЗУБ Николай Владимирович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Специальность 05.03.01 - Процессы механической
обработки, станки и
инструмент

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Харьков - 1995

Харьковский государственный политехнический университет
Библиотечно-информационный отдел
Харьков, 2000

Работа выполнена в проблемной лаборатории "Физика процессов резания инструментами из сверхтвердых материалов" имени М.Ф.Семко при кафедре "Инструменты" Харьковского государственного университета.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761574 (U)

Официальные оппоненты: ~~Заслуженный деятель науки и техники~~
Украины, доктор технических наук,
профессор
Розенберг Олег Александрович,
Доктор технических наук, профессор
Степанов Александр Александрович,
Доктор технических наук, профессор
Внуков Юрий Николаевич.

Ведущее предприятие: ГП "Завод имени Малышева", г.Харьков

Защита состоится "21" декабря 1995 г. на заседании специализированного ученого совета Д 02.09.01 в Харьковском государственном политехническом университете (310002, г.Харьков-2, ГСП, ул.Фрунзе, 21)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "18" ноября 1995 г.

Ученый секретарь специализированного ученого совета,
доктор технических наук,
профессор

Долгих И.Д.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальность. Технический прогресс порождает, с одной стороны, необходимость разработки новых материалов, а с другой – в значительной степени обуславливается результатами этих разработок. Появляясь вследствие естественного стремления к совершенствованию существующих изделий, новые материалы открывают возможности для реализации новых конструкторских и технологических решений. В настоящее время перспективы прогресса во многих отраслях связывают с широким применением полимерных композитов, на что указывает тенденция увеличения выпуска изделий из этих материалов.

Полимерные композиты обладают комплексом свойств и особенностей, отличающихся от металлических сплавов, и открывают широкие возможности для совершенствования изделий. Наибольшими потребителями изделий из полимерных композитов являются авиакосмическая, автомобильная, судостроительная, приборостроительная отрасли.

В работе изучались две большие группы обрабатываемых полимерных композитов. Первую из них составляют волокнистые полимерные композиты типа стеклопластиков, органопластиков, стекло-органопластиков, углепластиков. Эти материалы обеспечивают существенный выигрыш в массе, прочности, долговечности выпускаемых изделий.

Другую группу составляют аморфные полимеры, среди которых в последнее десятилетие больших объемов производства достигли оптические полимерные композиты. Получаются они путем полимеризации мономеров (стирола) и люминесцирующих добавок. Важнейшие их характеристики – прозрачность, светопоглощение, излучательная способность, в силу чего они находят широкое применение при создании детекторов для нового поколения ускорителей элементарных частиц, оптико-волоконной связи, дозиметров.

Самым распространенным технологическим процессом формообразования изделий из полимерных композитов является механическая обработка лезвийным инструментом, потенциально способная обеспечить стабильно высокие эксплуатационные характеристики изделий.

В настоящее время достижения в области механики разрушения

композитов дают возможность с позиции теории микро- и макроразрушения изучить процесс резания этих материалов, предложить новые подходы к созданию технологии процесса резания.

Рассматривая резание как процесс управляемого разрушения материалов, можно оценить влияние различных технологических факторов, сопровождающих отделение срезаемого слоя от заготовки, определить оптимальные параметры процесса обработки, дать рекомендации для разработки наиболее эффективных способов резания полимерных композитов и реализовать их при помощи элементов технологической системы, управлять формированием поверхностного слоя изделий.

Механика резания композитных материалов является главенствующим звеном, определяющим деформационные и контактные процессы в зоне обработки, и, по существу, является ключом к новым технологическим решениям, обеспечивающим высокую производительность и надежность процесса, требуемый высокий уровень функциональных свойств и минимальную себестоимость изделий.

Цель работы. Создание научных основ высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов, базирующихся на использовании закономерностей механики и физических особенностей резания, установленных оптимальных условий, обеспечивающих получение изделий с новым конкурентноспособным уровнем функциональных свойств.

Автор защищает.

1. Научные положения, составляющие теоретическую основу резания высокопрочных волокнистых и аморфных (оптических) полимерных композитов лезвийными инструментами обычной и сверхвысокой твердости.

2. Оригинальный способ исследования механики резания полимерных композитов, базирующийся на одновременной регистрации комплекса показателей интенсивности механолюминесценции и силы резания. Эффект механолюминесценции положен в основу изучения микропроцессов разрушения обрабатываемых композитов, так как поток фотонов является собственно продуктом деформации и разрушения материала.

3. Комплекс экспериментальных и теоретических исследований, на базе которых вскрыты основные закономерности микро- и мак-

ромеханики резания полимерных композитов. Установлено, что процесс направленного разрушения волокнистых композитов при резании характеризуется ударным циклически повторяющимся поведением. Выявлена взаимосвязь стартовой скорости движения трещины в обрабатываемом материале и скорости резания. Высокие скорости резания (14–20 м/с), малые сечения срезаемого слоя (соизмеримые с размерами армирующих элементов композита) обеспечивают движение впереди режущего клина системы ветвящихся трещин, которые приводят к минимизации энергетических затрат на процесс отделки срезаемого слоя материала и обеспечению требуемого качества поверхностного слоя изделий.

Для обеспечения высокого качества полимерных оптических материалов необходимо обеспечить такой механизм направленного разрушения, при котором отделение срезаемого слоя полимера происходит за счет полного взаимного проскальзывания цепей макромолекул при отсутствии микро- и макротрещин. Это происходит при невысоком и стабильном (минимальные амплитуды) уровне механолюминесценции и силы резания, который обеспечивается при невысоких скоростях (до 60 м/мин) и минимальных сечениях срезаемого слоя.

4. Новый подход к разработке элементов технологической системы для высокоэффективной механической обработки волокнистых и оптических полимерных композитов.

5. Основные закономерности процесса резания волокнистых и аморфных (оптических) полимерных композитов, в том числе:

- условия контактного взаимодействия обрабатываемого материала и режущего инструмента, которые получены методом делительных сеток и оптической микроскопии;

- силовые закономерности при различных процессах обработки, включая торцовое фрезерование крупногабаритных изделий;

- энергетические характеристики процесса разрушения обрабатываемых полимерных композитов при резании;

- условия устойчивости технологической системы в процессе чистового торцового фрезерования крупногабаритных полимерных оптических изделий;

- характер и условия распространения температуры и температурных полей в элементах технологической системы;

- гипотезу износа режущих инструментов.

6. Основные закономерности формирования поверхностного

слоя волокнистых и оптических полимерных композитов и его оценку при помощи методов имитационного моделирования и электронного парамагнитного резонанса; предложенные критерии оценки микропрофиля обработанной поверхности композитов.

7. Комплекс исследований по определению эксплуатационных характеристик изделий из волокнистых и аморфных (оптических) полимерных композитов; установленную взаимосвязь выходных оптических характеристик и долговечности изделия с параметрами обработки.

8. Оптимальные условия обработки полимерных композитов, полученные на основе анализа предложенной модели процесса резания и использования информационного банка данных, а также технические и технологические рекомендации по реализации высокоэффективных способов обработки.

Методы исследования. Методика теоретических исследований базировалась на основных положениях механики разрушения композитных материалов, теплофизики процессов резания, теории автоматического управления, теоретико-вероятностных подходах описания микропрофиля обработанной поверхности, теории оптимизации.

Моделирование решаемых в работе задач производилось с использованием метода Монте-Карло, метода конечных элементов, теории дифференциальных и интегральных уравнений.

Экспериментальные исследования основывались на оригинальных методиках и проводились на стендах, базирующихся на модернизированных фрезерных станках нормальной и повышенной точности, оснащенных комплексом электронной и оптической аппаратуры. Для исследования состояния поверхностного слоя композитов использовались поляризационно-оптические методы, профилографирование, в том числе лазерное, электронная микроскопия, методы ЭПР и ИК-спектроскопии.

Эксплуатационные показатели готовых изделий, получаемых при различных условиях механической обработки, оценивались при помощи стандартных (прочностные характеристики, водопоглощение) и оригинальных (деструкция, световой выход, радиационная стойкость, долговечность) методик.

Научная новизна.

1. Научное положение о системе спережающих режущих клин

ветвящихся трещин в снимаемом слое обрабатываемых волокнистых полимерных композитов, как важном факторе минимизации энергетических затрат на процесс обработки, с одной стороны, и формирование высоких функциональных свойств изделий - с другой. Управляя скоростью резания, сечением срезаемого слоя, структурой композита можно в целесообразном направлении влиять на характер и движение ветвящихся трещин, добиваясь требуемых выходных показателей процесса обработки.

2. Научное положение о потоке фотонов как собственном продукте деформации и разрушения полимерного композита при механической обработке, позволяющем объективно судить о процессах микроразрушения по интенсивности механолюминесценции в сочетании с данными о силе резания, при их одновременной регистрации.

3. Научное положение об определяющей роли в формировании высококачественного поверхностного слоя оптических полимеров механизма проскальзывания цепей макромолекул в зоне резания, как фактора снижающего присутствие микро-, макротрещин в обрабатываемом материале.

4. Научное положение о существовании для каждой пары "обрабатываемый материал - инструментальный материал" такого диапазона скоростей резания, в пределах которого развивается максимальная термическая деструкция, играющая отрицательную роль в формировании поверхностного слоя и функциональных свойствах изделий. Управляя в первую очередь скоростью резания, выбором сечения срезаемого слоя и инструментального материала можно избежать термической деструкции в обрабатываемых полимерных композитах.

5. Предложен новый подход к разработке элементов структуры технологической системы высокоскоростной механической обработки волокнистых и оптических полимерных композитов, в основу которого положены:

- особенности структуры и свойств полимерных композитов;
- установленные важнейшие закономерности механики направленного разрушения полимерных композитов при резании;
- целевой принцип создания гаммы режущих инструментов для обработки аморфных полимеров и волокнистых композитов - фрезы с новой формой зуба, лезвийно-абразивный инструмент, фрезы мелко-размерные сложнопрофильные, алмазные торцовые фрезы;
- новые способы обработки: вибрационное точение,

высокоскоростное фрезерование, торцовое фрезерование крупногабаритных цилиндрических поверхностей;

- создание специальных установок, технологическая возможность которых обеспечивает реализацию предложенных способов обработки в оптимальных условиях.

6. Предложена методология обеспечения высокоэффективной обработки оптических полимерных композитов, базирующаяся на имитационном моделировании процесса, управлении механизмом разрушения материала, температурно-силовых закономерностях и устойчивости технологической системы, позволяющая оптимизировать параметры резания при прецизионной обработке.

7. Предложен новый подход к оценке обрабатываемости полимерных композитов на основе комплекса найденных закономерностей микромеханики процесса резания, установления соотношения интенсивности механолюминесценции, силы и энергетических показателей процесса механической обработки.

8. Установлены закономерности формирования поверхностного слоя полимерных композитов в процессе механической обработки на основе создания статистико-вероятностной модели геометрии поверхности и экспериментально-теоретического прогнозирования состояния поверхностного слоя материала; установлено влияние этих факторов на эксплуатационные показатели изделий.

Практическая ценность. Результаты комплекса выполненных экспериментально-теоретических исследований составляют научные основы технологии резания волокнистых и оптических полимерных композитов.

Предложены рекомендации по разработке элементов структуры технологической системы высокоэффективной механической обработки волокнистых полимерных композитов, включая целевой принцип создания оборудования (для обработки крупногабаритных изделий с высокими скоростями резания) и режущего инструмента (осевой инструмент с новой формой зуба и лезвийно-абразивный инструмент); условиям и режимам обработки.

Представлены комплексные технологические рекомендации получения широкой гаммы полимерных оптических изделий, которые охватывают основные операции механической обработки: резка, фрезерование (в том числе алмазное), полирование. Предложен выбор оборудования, инструментов, приспособлений, режимов резания для выполнения этих операций.

Оригинальная методика исследования микромеханики и энергетических характеристик процесса резания позволили разработать способ оценки обрабатываемости полимерных композитов. Предложена классификация обрабатываемости различных волокнистых и оптических полимерных композитов.

Разработана автоматизированная система по выбору оптимальных параметров обработки волокнистых композитов, состоящая из оптимизационной модели режимов резания, информационного банка данных, подсистемы формирования и вывода на принтер полученных результатов. Разработана модель оптимизации параметров резания при прецизионной лезвийной обработке оптических полимерных изделий.

Эффективность работы. Разработанные технологические процессы высокоэффективной обработки изделий из полимерных волокнистых и оптических композитов внедрены на НПО "Ротор" (г.Черкассы), Белгородском заводе по переработке пластмасс, Центральном НИИ специального машиностроения (г.Хотьково, Московская область), НТК "Институт Монокристаллов" (г.Харьков) с экономическим эффектом свыше 1,1 млн.руб. (в ценах 1991 г.).

По предложенной технологии изготовлены партии крупногабаритных оптических изделий, оптических изделий типа "Tile" и "Shashlik" для Объединенного Института ядерных исследований (г.Дубна) по программе SSC (США) и "Полимерный Калориметр"; Ядерного центра в Швейцарии (ИНС), Большого Адронного Коллайдера (США), Ядерного центра России по программе "Сибирь-2".

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на 16 международных, 8 всесоюзных, ряде республиканских и отраслевых конференциях и семинарах. В том числе: Всесоюзной научно-технической конференции "Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационные свойства деталей машин" (г.Киев, 1980); Всесоюзной конференции "Теплофизика технологических процессов" (Волгоград, 1980; Тольятти, 1988; Рыбинск, 1992); Международном семинаре "Сверхтвердые материалы" (Киев, 1981); 5,6,7 Международных конференциях по технологии и инструменту (Мишколец, Венгрия, 1982, 1985, 1989); Всесоюзной конференции "Состояние и перспективы разработки и применения сцинтилляционных детекторов" (Харьков, 1986, 1993); Всесоюзной

конференции "Интенсификация технологических процессов механической обработки" (Ленинград, 1986); Международной конференции "Интертехно '90" (Будапешт, Венгрия, 1990); Всесоюзной конференции "Состояние и перспективы использования полимерных материалов в тракторном и автомобильном машиностроении" (Челябинск, 1990); Международной конференции "Проблемы резания материалов в современных технологических процессах" (Харьков, 1991); Международной конференции "Металлорежущие станки и ГПК" (София, Болгария, 1990); Международных конференциях "Micro CAD-system" (Венгрия, 1992, 1993; Харьков, 1993, 1994, 1995); Международном семинаре "Высокие технологии в машиностроении" (Харьков, 1992, 1993, 1994, 1995); 1 Международном симпозиуме Украинских инженеров-механиков (Львов, 1993); 2 Международной конференции "Влияние технологии обработки на состояние поверхностного слоя" (Познань, Польша, 1993); научных семинарах в Харьковском государственном политехническом университете, ИСМ НАН Украины, НТК "Институт Монокристаллов" НАН Украины, Харьковском физико-техническом институте НАН Украины, Московском государственном университете, Институте машин и систем НАН Украины, Шанхайском технологическом университете (Китай), Запорожском государственном техническом университете, Харьковском авиационном институте.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 75 работ (из них 9 без соавторов), в том числе одна монография, одна брошюра, общемашиностроительные нормативы режимов резания, 4 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 193 источника и приложения, содержащего алгоритмы и акты внедрения на предприятиях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Наиболее распространенным технологическим процессом получения готовых изделий из полимерных композитов, который обеспечивает требования по форме, качеству точности и качеству поверхностного слоя является обработка резанием.

Все возрастающие объемы применения изделий из полимерных композитов в 80-е годы дали толчок созданию ряда новых процессов обработки резанием. В фундаментальных работах В.И. Дрожжина, А.А. Степанова, Б.П. Штучного, Б.В. Лупкина, В.Кенига, И. Вульфа, А.Кобаяши и других ученых достаточно глубоко и полно вскрыты физические закономерности и технологические особенности обработки полимерных композитов. Превалирующая доля этих исследований посвящена обработке волокнистых полимерных композитов как наиболее труднообрабатываемых материалов. Много внимания уделено изучению стружкообразования, температурно-силовым закономерностям, износу инструмента, условиям формирования поверхностного слоя и оценке качества поверхности.

Констатируя значительный объем исследований в области резания волокнистых полимерных композитов, нельзя не отметить почти полное отсутствие исследований обработки аморфных полимеров, за исключением работ А.Кобаяши. Специалисты в области технологии резания не усматривали тут особых проблем, так как эти материалы не вызывают интенсивного изнашивания режущего инструмента и к этим изделиям ранее не предъявлялись высокие требования по качеству поверхностного слоя.

С разработкой нового класса аморфных полимеров, предназначенных для оптических изделий, с учетом все возрастающих объемов их потребления и высокой стоимости изделий, вопрос создания теории резания полимерных оптических композитов становится исключительно актуальным. Потребовалось создание таких способов обработки, которые позволили бы исключить большой объем трудоемких доводочных операций, обеспечить улучшение эксплуатационных характеристик, в том числе, стабильности и долговечности готовых оптических изделий, например, крупногабаритных с длиной свыше 3000 мм.

В основу настоящей экспериментально-теоретической работы положены исследования механики резания полимерных композитов, позволяющие создать и реализовать высокоскоростные процессы обработки, определить оптимальные условия резания волокнистых и оптических композитов путем использования установленных основных физических закономерностей.

Различия в составе и свойствах структуры металлов и полимерных композитов предопределяют отличие механики разрушения этих материалов. Металлы - чаще всего однородные изотропные ма-

териалы, композиты же обладают ярко выраженной анизотропией свойств. Процессу разрушения металла, в отличие от волокнистых полимерных композитов, предшествует значительная пластическая деформация. Эти отличия и определяют особенности механики резания полимерных композитов. Отметим, что многовариантные структуры композитных материалов предопределяют особенности свойств каждого из них, требующих изучения закономерностей механики их резания на микро- и макроуровне.

Изучение механики резания полимерных композитов, использование методов оптической и растровой микроскопии показали, что при лезвийной обработке волокнистых полимерных композитов в обрабатываемом материале впереди режущего клина образуется значительное количество макротрещин. В обрабатываемом полимерном оптическом материале при небольших скоростях резания и сечениях срезаемого слоя пластическая деформация происходит в тончайших приповерхностных слоях материала с образованием поверхности высокого качества.

Для изучения микромеханики процесса резания разработаны и созданы экспериментальные стенды, позволяющие вести исследования в широком диапазоне параметров обработки. Эффект механолюминесценции положен в основу изучения микропроцессов разрушения, происходящих при резании композитов. Первичный носитель деформации - поток фотонов, являющийся собственно продуктом процесса микроразрушения и одновременно важнейшей характеристикой процессов, происходящих на микроуровне. На стенде одновременно регистрируется интенсивность механолюминесценции и сила резания при помощи пьезодинамометра.

Установлено, что процесс разрушения волокнистых полимерных композитов (стеклопластика) при резании носит ударный циклически повторяющийся характер (рис. 1). При внедрении режущего клина в обрабатываемый материал происходит зарождение, рост и слияние микротрещин (1-2 участок). При достижении предельных значений напряжений обеспечивается старт макро- или магистральной трещины. Малые и средние скорости резания, большие сечения среза приводят к преимущественному отделению срезаемого слоя за счет движения квазимастральной трещины, что характеризуется максимальными значениями интенсивности механолюминесценции и силы резания. Высокие скорости резания (15-20 м/с), малые сечения среза обеспечивают движение системы ветвя-

щихся трещин, которые приводят к снижению интенсивности механолюминесценции и силы резания (рис. 2) и уменьшению энергозатрат на процесс отделения срезаемого слоя.

Характер разрушения зависит от марки обрабатываемого материала и направления армирования композита относительно вектора скорости главного движения резания (λ_1).

Резание оптических полимеров сопровождается отсутствием циклического ударного характера разрушения. Для обеспечения высокого качества оптических полимеров необходимо обеспечить такой механизм разрушения материала, при котором отделение срезаемого слоя полимера происходит за счет полного взаимного проскальзывания цепей макромолекул. Об этом свидетельствует невысокий и стабильный уровень механолюминесценции и силы резания при скоростях до 50 м/мин и минимальных сечениях среза.

Исходя из закономерностей механики разрушения композитов и экспериментальных данных по микромеханике резания, установлена взаимосвязь стартовой скорости движения трещины и скорости резания для различных обрабатываемых материалов. Определена скорость резания, которая характеризует энергию разрушения слоя материала, величины которой будет достаточно не только для продвижения магистральной опережающей трещины, но и для слияния и продвижения соизмеримых с магистральной ветвей сопутствующих трещин. Избыток энергии разрушения идет не на увеличение скорости движения трещины, а на рост количества ветвящихся трещин.

Предельным скоростям движения трещины в стеклопластике (700 м/с) и органопластике (380 м/с) соответствуют скорости резания 20 м/с и 16 м/с, что подтверждено проведенными экспериментами. Уменьшение сечения срезаемого слоя (в первую очередь толщины среза) способствует проявлению эффекта взаимодействия отраженных волн, переходу зоны нагружения в плоско-напряженное состояние, что приводит к уменьшению динамического коэффициента интенсивности напряжений и снижению энергозатрат на процесс резания.

Установленные закономерности механики резания позволили сформулировать новый подход к разработке элементов технологических систем для обработки различных полимерных композитов. Это обеспечивается конструкцией элементов технологической системы, кинематикой движения заготовки и режущего инструмента, маркой инструментального материала, режимами резания.

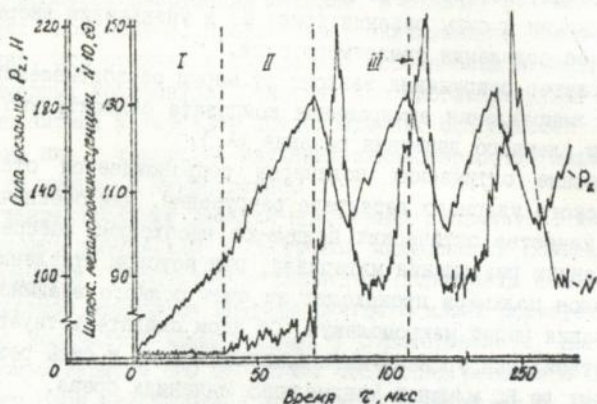


Рис.1. Графическая интерпретация результатов исследований
 $(V = 2 \text{ м/с}, t = 0,5 \text{ мм}, \lambda_1 = 90^\circ)$

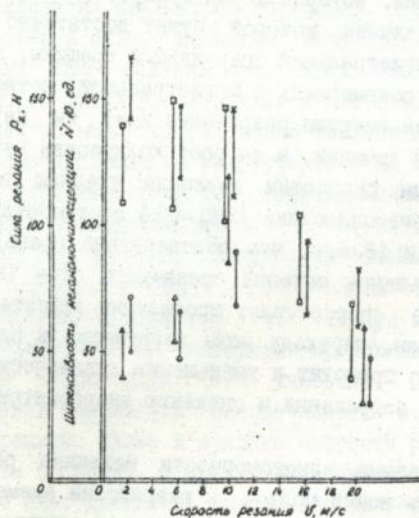


Рис.2. Влияние скорости резания на интенсивность механолюминесценции и силу резания при обработке стеклопластика. Вертикальные отрезки означают:

Δ - среднее значение N при $\lambda_f = 0^\circ$; \circ - то же для P ;
 \square - среднее значение N при $\lambda_f = 90^\circ$; \times - то же для P .
 (Постоянные параметры среза: $a = 0,14 \text{ мм}$; $b = 0,7 \text{ мм}$).

Примеры технической реализации условий эффективной обработки полимерных композитов показаны на рис. 3.

Для обработки волокнистых композитов с органическим наполнителем разработана новая форма зуба инструмента, которая может применяться в цилиндрических, концевых, торцовых фрезях и сверлах (рис. 3а). Главные и вспомогательные режущие кромки лезвия этого инструмента не лежат на одной поверхности и представляют собой прямолинейные участки, лежащие на передней поверхности, и винтовые участки, лежащие на задней поверхности. Конструкция лезвия инструмента позволяет удалять сечение срезаемого слоя материала путем его дробления на составляющие, образованные режущими кромками. Это обеспечивает в процессе обработки волокнистых композитов удаление минимальных сечений среза, что является реализацией одного из главных условий эффективного резания.

Разработана конструкция лезвийно-абразивного режущего инструмента, реализованная в цилиндрических и концевых фрезях, позволяющая синтезировать преимущества лезвийного и абразивного инструмента (рис. 3б). В основу конструкции инструмента положен режущий клин, задний угол которого равен нулю. На заднюю поверхность инструмента наносятся алмазные зерна, которые закрепляются с помощью гальванической связки. Срезаемый зубом фрезы слой материала разделяется на две части: слой, удаляемый лезвием фрезы, и меньший слой материала, снимаемый алмазными зернами. Конструкция инструмента обеспечивает высокое качество обработанной поверхности волокнистых композитов с абразивным наполнителем при высокой производительности процесса.

Разработана гамма режущих инструментов (алмазные торцовые фрезы, концевые и сферические фрезы, сверла) для обработки широкой номенклатуры оптических полимерных изделий.

Разработана установка на базе горизонтально-фрезерного станка, позволяющая производить процесс цилиндрического и концевого фрезерования с высокими скоростями резания. Анализ процесса высокоскоростного фрезерования показал, что производительность обработки возрастает в 10-30 раз по сравнению с традиционным процессом фрезерования.

Полученные закономерности микромеханики разрушения волокнистых полимерных композитов при резании послужили основой для разработки нового процесса точения этих материалов (рис. 3в).

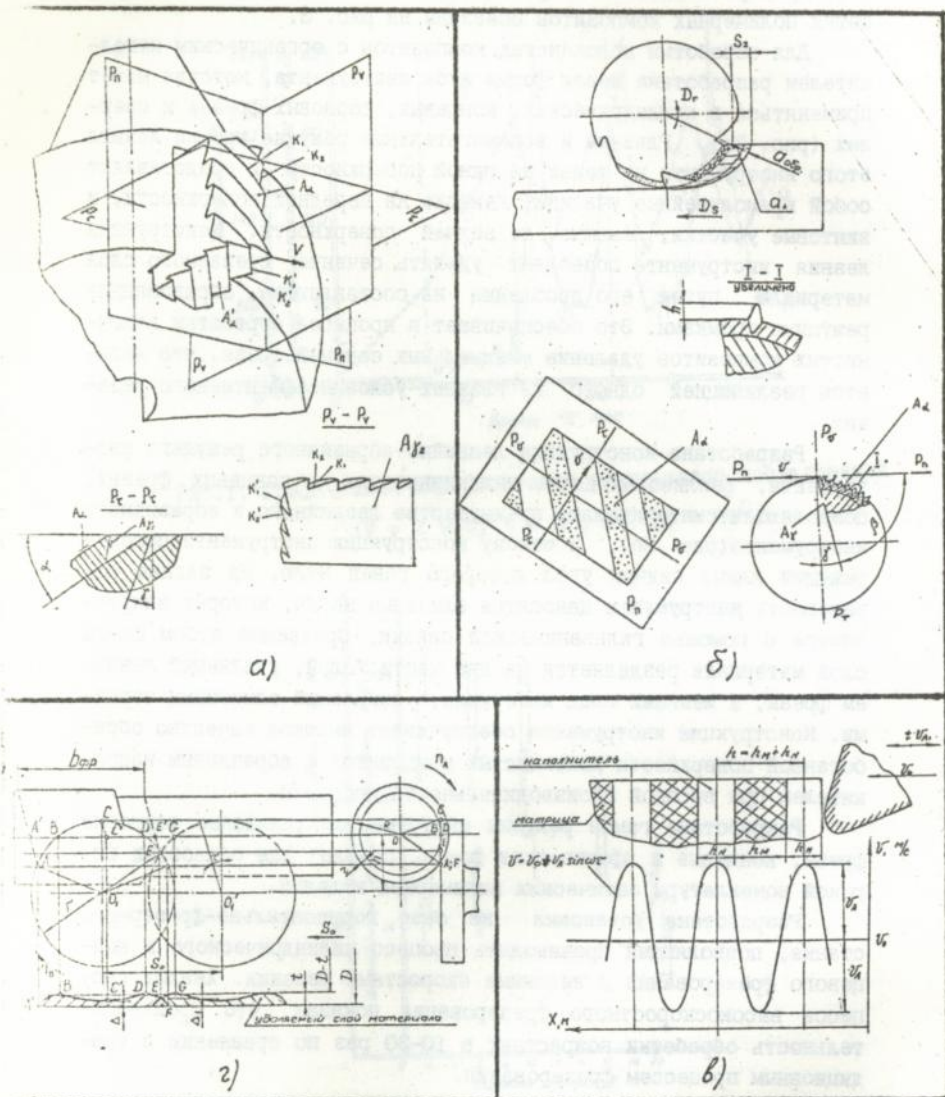


Рис.3. Примеры реализации условий эффективной обработки полимерных композитов

Суть его состоит в том, что установленному синусоидальному характеру изменения механолюминесценции и силы резания строго соответствуют изменения мгновенной скорости резания, вызываемые путем приложения к резцу вибрационных колебаний. Максимальные значения скорости резания реализуются при пересечении клином армирующего элемента композита, а минимальные - при обработке полимерной матрицы. Для установления величины амплитуды колебаний переменной скорости резания принят подход, отражающий энергетические затраты на обработку композитных составляющих материала наполнителя и матрицы. Энергетические затраты выражаются через безразмерный коэффициент (f). Установлена взаимосвязь между предельными значениями скорости резания (V_a), коэффициентом (f) и размерами компонентов обрабатываемого волокнистого полиполимерного композита.

$$V_a = V_0 \pm \frac{f_{\theta} h_H - h_M}{f_{\theta} h_H + h_M}$$

где V_0 - среднее (нормативное) значение скорости резания;

h_H - линейная длина армирующего элемента композита;

h_M - линейная длина элемента матрицы композита;

$$f_{\theta} = \frac{P_{\max H}}{P_{\min M}}$$

где $P_{\max H}$ - значение максимальной силы резания на участке обработки армирующего элемента;

$P_{\min M}$ - значение минимальной силы резания на участке обработки матрицы.

Рассчитаны значения частоты ($\nu = \frac{V_0}{h_H + h_M}$) и амплитуды

$$V_a (h_H + h_M)$$

($A = \frac{V_a (h_H + h_M)}{2\pi V_0}$) колебания резца. В качестве источника вибраций применялся ультразвуковой генератор.

При вибрационном точении стеклопластика наблюдается умень-

шение силы резания на 40%, а шероховатости — до двух раз.

Решена задача эффективной обработки наружных цилиндрических поверхностей крупногабаритных изделий из волокнистых композитов (стеклопластик + полиуритан) методом торцового фрезерования с круговой и продольной подачей (рис. 3г), позволяющая значительно увеличить, по сравнению с точением, производительность обработки при требуемых характеристиках макро- и микронеровности поверхности изделия и обеспечить утилизацию отходов обработки за счет получения дробленой диспергированной стружки. Для поиска оптимальных технологических условий механической обработки крупногабаритных изделий требуется варьирование в широком диапазоне значительным количеством параметров. Экспериментальный перебор варьируемых факторов при фрезеровании приводит к большому числу трудоемких опытов, неоправданному расходу обрабатываемого и инструментального материалов. Разработана модель расчета выбора оптимальных условий процесса торцового фрезерования. Особенность алгоритма состоит в том, что при выборе параметров обработки увязаны вопросы кинематики формообразования поверхности, геометрические параметры инструмента и режимы резания, обеспечивающие эффективное удаление срезаемого слоя, получение максимальной производительности при заданных требованиях к качеству поверхности. Разработанный процесс кругового фрезерования сопоставлялся с процессом точения. Установлена адекватность разработанной модели экспериментальным результатам. Процесс кругового фрезерования позволил повысить производительность обработки крупногабаритных изделий в 5-18 раз по сравнению с процессом точения.

Для оптимизации процесса резания полимерных композитов и формирования поверхности высокого качества необходимо иметь информацию о физических явлениях, протекающих в зоне обработки. Это особенно важно при создании новых процессов обработки, в том числе для обработки полимерных оптических изделий.

Изучены закономерности контактного взаимодействия режущих инструментов с обрабатываемыми материалами методом делительных сеток (методика Г.Д.Деля) и в поляризованном свете. Минимальная зона деформации полимерного оптического материала обеспечивается положительными передними углами и минимальными сечениями срезаемого слоя материала. Величина упругого восстановления волокнистых композитов уменьшается на 60-80% при увеличении зна-

чения заднего угла и уменьшении радиуса округления инструмента.

Проведены комплексные исследования динамики процесса резания полимерных композитов.

Относительно низкое сопротивление внедрению режущего клина в обрабатываемый композит приводит к возникновению в процессе резания меньшей силы, чем при резании металла. Тем не менее уровень силы резания является достаточно высоким, что оказывает существенное влияние на формирование качества поверхностного слоя, выбор режимов резания, и геометрических параметров инструмента, а также мощности привода станка, особенно при обработке заготовок с большими сечениями среза (круговое фрезерование). Высокие скорости резания приводят к заметному снижению величины составляющих силы резания при обработке волокнистых и оптических полимерных композитов.

Силовые закономерности, полученные при обработке оптических полимеров, указывают на значительное влияние глубины резания. Увеличение глубины резания свыше 1,0 - 2,0 мм приводит к увеличению составляющих силы резания в 4,0 - 6,0 раз.

Обязательным условием получения высокой точности и низкой шероховатости изделий является минимизация вибраций в зоне резания. Главным динамическим звеном технологической системы принята заготовка, на которую крепился датчик. Масса и условия крепления заготовки во всех экспериментах были одинаковы. Определение частотных характеристик колебательной системы выполнено методом спектрального анализа сигналов акселерометра. При обработке стеклопластика отмечается значительная мощность спектра в области низких частот, которая определяется периодичностью силы фрезерования, неуравновешиваемостью вращающихся масс и колебаниями технологической системы. В то же время выделяется два "плавающих" частотных диапазона вибраций, которые определяются особенностями структуры композиционного материала и зависят от скорости резания. Минимальная мощность спектра вибраций наблюдается в зоне минимальных сечений среза. Высокая скорость обработки приводит к некоторому увеличению мощности спектра в низкочастотной области.

С использованием динамического стенда изучены энергетические аспекты процесса разрушения композитного материала при фрезеровании в зоне малых, средних и высоких скоростей резания.

Динамический стенд фирмы "Hewlett Packard" позволял

получать энергетические характеристики на высоких скоростях обработки. Энергию процесса резания материалов рассчитывали на трех основных этапах обработки: вход инструмента, квазистационарный режим и выход инструмента. Для установления величины кинетической энергии разрушения снимаемого слоя материала при фрезеровании фиксировался характер изменения величины ускорения во времени. Акселерометр крепился на обрабатываемой заготовке. Для более объективной оценки энергии резания значение энергии отнесено ко времени, характеризующему данный участок процесса обработки, и эта величина названа относительной энергией разрушения материала. Наибольшая доля энергии приходится на квазистационарный процесс резания. Значение энергии резания при обработке стеклопластика ($\lambda_1 = 0^\circ$) на 15 - 30% меньше энергии, образующейся при резании стеклопластика ($\lambda_1 = 90^\circ$). Вход инструмента сопровождается более высокими значениями энергии по сравнению с выходом инструмента. Высокие скорости резания (1000 - 1200 м/мин) приводят к заметному снижению величины относительной кинетической энергии, чему способствует более эффективный механизм разрушения полимерных композитов. При высоких скоростях резания происходит выравнивание энергетических показателей процесса при различных значениях λ_1 .

Важнейшим фактором при обработке крупногабаритных оптических изделий является устойчивость технологической системы. Устойчивый характер процесса обработки позволил обеспечить высокие показатели микро- и макрогеометрии поверхности оптических деталей. Динамическое состояние технологической системы с обратными связями, имеющей две степени свободы, описывалось в соответствии с работами М.Е.Зльсберга системой шестого порядка

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{x_2}^2 \ddot{X} + T_{x_1} \dot{X} + X = \bar{Q}, \\ T_{y_2}^2 \ddot{Y} + T_{y_1} \dot{Y} + Y = \bar{P}, \\ T_p \ddot{P} + \bar{P} = -K_x X - T_{ky_1} \dot{Y}, \\ T_Q \ddot{Q} + \bar{Q} = \bar{P} - T_{kx} \dot{X} + T_{ky_2} \dot{Y} \end{array} \right.$$

Система включает в себя собственно уравнения вынужденных колебаний под действием динамической силы резания (первое и

второе уравнение) и уравнения запаздывания (третье и четвертое уравнение), описывающие связь между изменениями перемещений системы (толщины среза) и запаздывающей по отношению к ним силой резания (автоколебания процесса резания).

При этом коэффициент возмущения в уравнениях запаздывания в отличие от работ М.Е.Эльясберга, определяется как функция углового положения фрезы при введении некоторой энергетически эквивалентной плотности непрерывного распределения зубьев фрезы, что существенно уменьшает погрешность расчетов при малом числе зубьев ($Z < 6$), характерном для прецизионного процесса обработки.

Анализ устойчивости технологической системы осуществляется путем решения линеаризованных уравнений, определяющих состояние динамической системы. Построен численный итерационный алгоритм определения значения глубины фрезерования, который при заданной подаче и скорости резания обеспечивает устойчивость технологического рабочего процесса (рис.4), то есть обработку с некоторой результирующей амплитудой колебаний профиля поверхности детали, не превышающей некоторого наперед заданного значения микропрофиля поверхности (в нашем случае $R_a \leq 0,06$ мкм).

Температура резания является одним из важнейших физических факторов обработки, так как от уровня температуры зависит степень термической деструкции изделий из полимерных композитов.

Температура при резании полимерных композитов определялась экспериментально с помощью жидкокристаллических термопленок, заподимеризованных в образец обрабатываемого материала.

Установлены экспериментальные закономерности влияния режимов резания на температуру при обработке различных композитов. При обработке композитных материалов максимальные температуры наблюдаются в зоне средних скоростей резания, так как в этом случае увеличивается пластическая деформация полимера. При высоких скоростях резания пластическая деформация переходит в хрупкое разрушение, что приводит к меньшему тепловыделению. Происходит локализация зоны разрушения и снижение температуры в зоне резания. Подача и глубина в меньшей мере влияет на температуру резания.

С использованием методов конечных элементов решена аналитическая задача определения температурных полей в элементах технологической системы при обработке оптических полимеров.

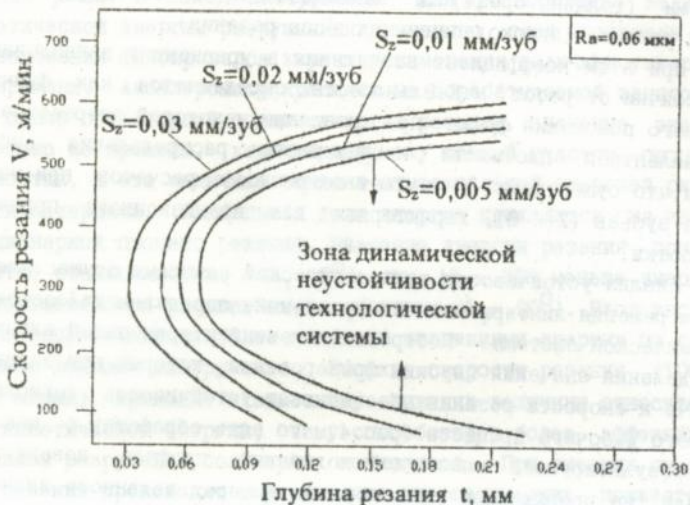


Рис. 4. Зона устойчивости технологической системы при обработке оптических изделий

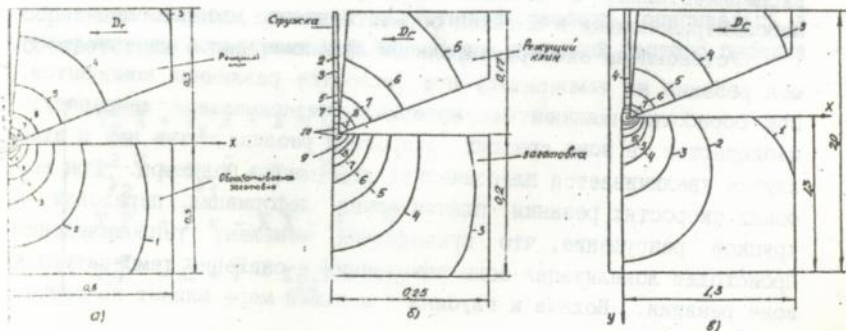


Рис. 5. Графическое изображение расположения изотерм в технологической системе
 а, б - $S_z = 0,01$ мм/зуб, в - $S_z = 0,06$ мм/зуб

В основу расчета положена методика А.М.Розенберга и О.А.Розенберга. Задача теплопроводности рассматривается для плоской области, состоящей из обрабатываемого материала, рассматриваемого совместно со стружкой, находящейся в контакте с инструментом. Источники тепла располагались по плоскости сдвига, по передней и задней поверхности инструмента. Уравнение теплопроводности при заданных интенсивностях тепловых потоков решается с учетом граничных условий второго, третьего и четвертого рода. Аналитически рассчитаны положения изотерм в технологической системе (рис.5) и показаны их численные значения (табл.1).

Максимальная концентрация температуры наблюдается на расстоянии 0,02 - 0,04 мм от обработанной поверхности. Установлен диапазон скоростей резания и подач, который является приемлемым с точки зрения формирования оптической поверхности высокого качества.

Изучен механизм износа режущих инструментов при обработке полимерных композитов. Период катастрофического изнашивания инструмента не рассматривался, так как ему всегда предшествует недопустимое ухудшение качества обработанной поверхности. Поэтому использовали критерий технологического износа. Для режущих инструментов, которые осуществляют обработку оптических материалов, более эффективным показателем изнашивания является величина изменения радиуса округления лезвия инструмента. Установлены зависимости "Т - V" работы инструмента при обработке различных композитов, и показано несомненное преимущество алмазного инструмента. Проведенный комплекс исследований позволил сформулировать гипотезу механизма износа инструмента при резании полимерных композитов. При обработке волокнистых композитов с абразивным наполнителем износ инструмента происходит благодаря абразивно-механическому изнашиванию. В других случаях износ инструмента протекает за счет хрупкого микроразрушения под действием усталостно-адсорбционных факторов и усиливается адгезионными явлениями особенно при обработке оптических полимеров.

Установлено влияние условий обработки на шероховатость обработанной поверхности волокнистых полимерных и оптических композитов. Наименьшая шероховатость (R_z 5-7 мкм) наблюдается при алмазном фрезеровании материала "углерод-углерод", что определяется плотной упаковкой и высокой жесткостью армирующих элементов. Локализация зоны разрушения волокнистых композитов

Таблица 1

Численные значения температурных полей в технологической системе

Номер изотермы	Значения изотермы в °С									
	Подача $S_z = 0,01$ мм/зуб					Подача $S_z = 0,06$ мм/зуб				
	Скорость резания V , м/мин					Скорость резания V , м/мин				
	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2	22	25	27	29	31	31	42	53	63	73
3	25	29	34	39	43	42	63	86	107	127
4	26	34	41	48	55	52	85	119	150	181
5	29	39	48	57	68	69	107	152	194	235
6	32	44	55	67	79	74	127	185	237	289
7	34	48	62	76	90	85	150	217	281	342
8	36	52	69	86	102	95	172	250	324	397
9	38	58	76	95	113	105	194	283	368	450
10	41	62	83	104	124	117	215	316	411	504

при высоких скоростях резания обеспечивает заметное снижение шероховатости поверхности (R_z 10-20 мкм). Увеличение сечения срезаемого слоя приводит к значительному росту шероховатости (прямо пропорциональная зависимость). Сечения среза, соизмеримые с величиной армирующих элементов, обуславливают минимальную шероховатость обработанной поверхности.

Для оптических изделий разработан критерий достаточной шероховатости ($KR_z = R_z < \lambda 10^3$), который связывает численным соотношением параметр шероховатости и длину оптической волны (λ , нм) пропускаемого через детектор светового пучка. Параметр достаточной шероховатости должен быть обеспечен на этапе лезвийной обработки. Минимальная шероховатость обработанной поверхности оптических изделий формируется при малых скоростях ($V \leq 50$ м/мин) резания и подачах ($S_z \leq 0,01 - 0,05$ мм/зуб). Из инструментальных материалов наиболее приемлемым является природный монокристалл алмаза, имеющий минимальный радиус округления и полную адгезионно-адсорбционную пассивность к обрабатываемому материалу. При помощи корреляционного и вероятностно-статистического анализа осуществлялась оценка реального микропрофиля композита. Установлено, что коэффициент случайности профиля γ_p зависит от особенностей структуры композитного материала, характера его разрушения, кинематики движения и режимов резания. Высокие скорости резания приводят к снижению величины микропрофиля поверхности и увеличению значения γ_p до 0,8 - 0,95, что соответствует процессу шлифования этих материалов. Для оптических изделий оптимальные значения γ_p лежат в пределах 0,78 - 0,83.

Разработана экспериментальная методика оценки степени деструкции поверхностного слоя изделий из волокнистых и оптических полимерных композитов, которая базировалась на использовании электронного парамагнитного резонанса. Степень деструкции оценивалась по количеству стабильных макрорадикалов, регистрируемых радиоспектрометром с поверхности обрабатываемого материала или стружки. Впервые установлена количественная взаимосвязь между режимами резания (скоростью и подачей), инструментальными материалами и степенью деструкции полимерных композитов. При увеличении скорости резания волокнистых и оптических материалов на графике изменения степени деструкции фиксируется перегиб, что характеризует переход механической

деструкции в термическую, связанный с ростом температуры в зоне резания. В интервале высоких скоростей (900 - 1100 м/мин для волокнистых композитов и 300 - 350 м/мин для оптических полимеров) отмечается снижение степени термической деструкции композитов на 20-25%.

Установлено, что для каждой пары "обрабатываемый материал-инструментальный материал" существует диапазон скоростей резания, в котором фиксируется максимальная термическая деструкция. Так для пары "стеклопластик-ВК8" этот диапазон находится в интервале 850-900 м/мин, а пара "стеклопластик-СКМ-Р" имеет интервал 900-1100 м/мин. При обработке оптических полимеров алмазным инструментом СКМ-Р максимальная термическая деструкция соответствует скорости 300 м/мин. Установление указанных значений позволяет избежать опасного уровня деструкции, применяя в процессе обработки либо низкие, либо высокие скорости резания. Степень термической деструкции заметно снижается при использовании инструментального материала с высокой теплопроводностью. Одним из перспективных методов оценки состояния поверхностного слоя композитов является имитационное моделирование с помощью ЭВМ (рис. 6), который позволяет оценить глубину проникновения деструкции. Метод предусматривает формирование при помощи ЭВМ информации об отдельных структурных элементах исследуемой системы, а также имитирование процессов, протекающих в этой системе, где учитывается преимущественно силовое воздействие инструмента на обрабатываемый материал. В схему включены следующие элементы: структурная модель композита; модель формирования в памяти ЭВМ информации о локальных прочностных свойствах и взаимном расположении структурных элементов, а также разработка критериев локальных разрушений материала; механизм перераспределения напряжений в нагруженном слое и взаимодействия микромеханизмов разрушения. Прочностные свойства композита моделировались методом Монте-Карло и генератором случайных чисел. Данный механизм позволяет рассмотреть условия формирования поверхностного слоя полимерного композита по мере движения режущего клина вдоль обрабатываемого материала. Каждому микрообъему поверхности материала присваивался соответствующий маркер: R1 - распространение трещины в матрице; R2 - разрушение волокна; R3 - отслое-

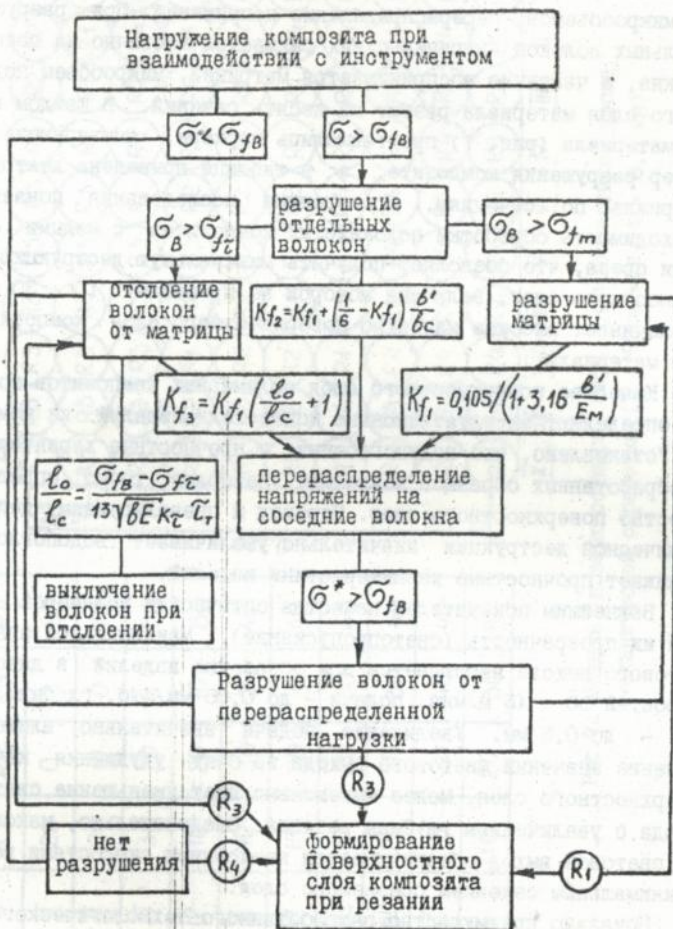


Рис. 6. Схема взаимодействия микромеханизмов формирования поверхностного слоя волокнистых полимерных композитов при резании

ние волокон от матрицы или разрушение микрообъема; R4 - отсутствие разрушения в микрообъеме.

Последовательность операций, имитирующих на ЭВМ развитие деструкции стеклопластика, предусматривает пошаговое перемещение инструмента (с шагом, равным расстоянию между волокнами), сравнение возникающих напряжений в волокнах с локальными значениями их прочности, выключение из работы разрушившихся волокон или микрообъемов, перераспределение напряжений. При разрушении отдельных волокон нагрузка с них снимается частично на соседние волокна, а частично воспринимается матрицей. Микрообъем подрезового слоя материала разбит на десять сечений. В каждом сечении материала (рис. 7) проставлялись маркеры, имитирующие характер разрушения композита, а в таблице приведена деструкция материала по сечениям. Проведенные исследования показывают необходимость обработки волокнистых композитов с малыми сечениями среза, что позволяет получить минимальную деструкцию поверхностного слоя, величина которой не превышает 10 - 30 мкм и обеспечивает высокое качество поверхностного слоя композиционного материала.

Качество поверхностного слоя полимерных композитов во многом определяют эксплуатационные показатели изделий из композита. Установлено, что водопоглощение и прочностные характеристики обработанных образцов позволяют наиболее точно определить качество поверхностного слоя. Переход к преобладающему действию термической деструкции значительно увеличивает водопоглощение и снижает прочностные характеристики изделий.

Важнейшим показателем качества оптических полимеров является их прозрачность (светопропускание). Максимальное значение светового выхода наблюдается при обработке изделий в диапазоне скоростей 30 - 45 м/мин, подачи - до 0,05 мм/зуб, глубины резания - до 0,5 мм. Увеличение подачи значительно влияет на снижение значений светового выхода за счет ухудшения качества поверхностного слоя. Менее интенсивно идет уменьшение светового выхода с увеличением глубины резания. Следовательно, максимальный световой выход обеспечивается невысокими скоростями резания и минимальным сечением срезаемого слоя.

Показано преимущество разработанного технологического процесса (алмазная лезвийная обработка и полирование), который обеспечивает увеличение срока службы изделия почти в три раза

Сече- ния	Объем разрушения в сечении, %			
	R1	R2	R3	R4
I	20	0	0	80
II	20	10	0	70
III	30	20	0	50
IV	10	20	10	60
V	10	30	20	40
VI	10	20	30	40
VII	10	20	30	40
VIII	20	20	30	40
IX	0	20	40	40
X	10	20	30	40

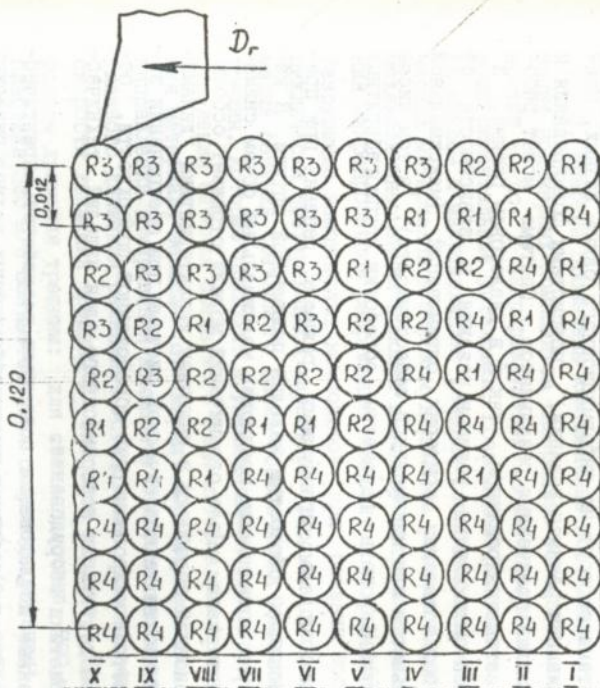


Рис.7. Модель поверхностного слоя стеклопластика после механической обработки ($V = 90$ м/мин, $t = 0,5$ мм)

при требуемых оптических характеристиках. Это происходит за счет создания бездефектного поверхностного слоя путем максимального снижения температурно-силовых деформаций в зоне резания.

Разработана и внедрена автоматизированная система по выбору оптимальных параметров обработки волокнистых полимерных композитов. Система состоит из информационного банка данных, подсистемы оптимизации режимов резания, подсистемы формирования и вывода на дисплей полученных результатов. Система может работать как в автоматизированном, так и в диалоговом режиме, и решает вопросы оптимизации режимов резания в зависимости от выбранного пользователем критерия оптимизации (максимальной производительности или минимальной себестоимости), в том числе позволяет оптимизировать параметры обработки крупногабаритных изделий.

Предложена модель оптимизации режимов резания при прецизионной лезвийной обработке изделий полимерной оптики. В качестве критерия оптимизации предложен максимальный объем снимаемого слоя материала. Поле ограничений модели отражает особенности прецизионной обработки и включает характеристики динамической устойчивости технологической системы при обеспечении заданных параметров микрогеометрии обработанной поверхности, отсутствие термодеструкции поверхностного слоя изделий, технические характеристики оборудования.

Проведенные исследования позволили разработать практические рекомендации по созданию высокоэффективных технологических процессов лезвийной обработки изделий из волокнистых полимерных композитов и оптических полимеров.

Прогрессивные процессы механической обработки изделий из полимерных композитов внедрены на предприятиях различных отраслей машиностроения при изготовлении широкой номенклатуры изделий с экономическим эффектом свыше 1,1 млн.руб. (в ценах 1991 года).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Впервые реализован комплексный системный подход к созданию научных основ высокоэффективных процессов лезвийной обработки высокопрочных волокнистых и оптических полимерных композитов на основе закономерностей механики резания, физического и

математического описания процесса обработки, качества поверхностного слоя композитных изделий. Сформирован банк данных для расчета оптимальных параметров процесса резания и на этой основе разработана прогрессивная технология и технические рекомендации по механической обработке широкой номенклатуры изделий из композитов, в том числе, и крупногабаритных.

2. Впервые проведены комплексные исследования механики резания полимерных композитов на основе установления закономерностей микро- и макроразрушения этих материалов. Разработаны экспериментальные установки, позволяющие выполнить исследования по микро- и макромеханике резания различных волокнистых и оптических материалов в широком диапазоне режимов обработки. Эффект механолюминесценции положен в основу экспериментального изучения микропроцессов разрушения композитов (А.С.Н 1663508. СССР). Разрушение волокнистых композитов при резании носит ударный, циклически повторяющийся характер. Высокие скорости резания, малые сечения срезаемого слоя обеспечивают движение ветвящихся трещин, которые приводят к уменьшению энергозатрат на процесс отделения сечения срезаемого слоя материала. Механизм разрушения материала зависит от марки обрабатываемого материала и направления армирования композита относительно вектора скорости главного движения резания. Установлена взаимосвязь стартовой скорости движения трещины и скорости резания. Предельным скоростям движения трещины: для стеклопластика 700 м/с, органо-пластика 350 м/с соответствуют скорости резания: для стеклопластика 20 м/с, органо-пластика 14 - 16 м/с, стеклоорганопластика 15 - 18 м/с. Эти скорости резания являются наиболее эффективными с позиций механики разрушения.

Изучение механики резания полимерных оптических материалов указывает на отсутствие ударного характера разрушения. Для обеспечения высокого качества полимерных оптических изделий необходимо обеспечить такой механизм разрушения материала, при котором отделение срезаемого слоя полимера происходит за счет полного взаимного проскальзывания цепей макромолекул при отсутствии микротрещин. На это указывает невысокий и стабильный уровень механолюминесценции и силы резания при скорости обработки до 50 м/мин и предельно малых сечениях среза.

3. Установленные закономерности разрушения волокнистых и оптических полимерных композитов при резании позволили разрабо-

тать основные предпосылки создания прогрессивных технологических процессов механической обработки. Обработка волокнистых полимерных композитов должна осуществляться за счет высоких скоростей резания (15 - 20 м/с), которые лимитируются условиями теплообразования, определяющими износостойкость инструмента и термодеструкцию материала; минимальных сечений среза, сопоставимых с размерами армирующих элементов композита. Значительные отличия в свойствах волокнистых композитов требуют индивидуального технологического решения процесса обработки.

Оптические полимеры необходимо обрабатывать на низких скоростях резания (до 60 м/мин) с возможно меньшими сечениями срезаемого слоя.

Оптимальные условия обработки полимерных композитов должны обеспечиваться специальной конструкцией элементов технологической системы (оборудование, режущий инструмент, приспособления), кинематикой движения, инструментальными материалами и геометрическими параметрами режущего инструмента, условиями контактирования инструмента и заготовки, режимами резания.

4. Разработана гамма режущих инструментов для обработки волокнистых композитов и оптических полимеров. Прецизионное фрезерование плоских поверхностей оптических деталей осуществляется торцевой фрезой, оснащенной монокристаллическим природным алмазом или мелкозернистым поликристаллом синтетического алмаза. Для обработки сложной ("ключ", "полуключ") петлеобразной канавки под световод разработаны и изготовлены специальные цилиндрические и сферические фрезы малого диаметра. Эффективная обработка волокнистых композитов с органическим наполнителем осуществляется режущим инструментом с новой формой зуба (А.С. N 1517229. СССР), конструкция которого позволяет удалять суммарное сечение срезаемого слоя материала путем его дробления на части и тем самым эффективно разрушать композитный материал при резании. Композиты с абразивным наполнителем эффективно обрабатываются лезвийно-абразивным инструментом (А.С. N 1630145. СССР), в котором синтезируются преимущества лезвийного и абразивного инструмента.

5. Основные закономерности механики разрушения волокнистых полимерных композитов послужили основой для разработки процесса высокоскоростного резания на операциях фрезерования и точения. Реализован процесс вибрационного точения волокнистых компози-

тов, который обеспечивает обработку матрицы и армирующих составляющих композита на оптимальных скоростях резания, что позволяет уменьшить в два раза шероховатость обработанной поверхности стеклопластика и на 30 - 40% снизить силу резания. Решена технологическая задача эффективной обработки наружных цилиндрических поверхностей крупногабаритных изделий из волокнистых композитов методом торцового фрезерования с круговой и продольной подачей, позволяющим значительно повысить (в 18 раз), по сравнению с точением, производительность обработки и обеспечить утилизацию отходов. Разработана модель расчета оптимальных условий торцового фрезерования, алгоритм которой дает возможность увязать вопросы кинематики формообразования поверхности, геометрические параметры режущего инструмента и режимы резания. Для существующих типов крупногабаритных станков рассчитаны технологические условия обработки композиционных цилиндрических каркасов методом торцового фрезерования, что позволило увеличить производительность в 2,5 - 5,0 раз по сравнению с процессом точения.

6. Установлены основные закономерности контактного взаимодействия обрабатываемых композитных материалов и режущего инструмента. С использованием метода делительных сеток получены эпюры деформаций в обрабатываемом оптическом материале при изменении переднего угла инструмента и глубины резания.

Экспериментально установлены основные силовые закономерности при обработке различных полимерных композитов. Высокие скорости резания приводят к заметному снижению составляющих сил резания при обработке волокнистых композитов. Установлено, что эффективная мощность резания при торцовом фрезеровании плоскостей и цилиндрических изделий одинакова. Значительное влияние на силу резания при обработке оптических полимеров оказывает глубина резания, марка инструментального материала и радиус округления режущего инструмента.

На специальной установке, оснащенной акселерометром и динамическим анализатором, изучены вибрации при обработке полимерных композитов и энергетические характеристики процесса резания. Установлено, что композиционная структура обрабатываемого волокнистого материала приводит к возникновению двух зон вибраций, частотный диапазон которого определяется структурой композита и скоростью резания. Разработана методика расчета

энергетических характеристик процесса резания. Высокие скорости резания приводят к заметному снижению энергии резания за счет эффективного разрушения волокнистых полимерных композитов.

7. Разработана экспериментально-аналитическая модель расчета устойчивости технологической системы в процессе фрезерования полимерных оптических изделий, алгоритм которой реализован на ПЭВМ. Построен алгоритм определения предельного значения глубины фрезерования, который при заданной подаче и скорости резания обеспечивает устойчивость технологического рабочего процесса, то есть обработку с некоторой результирующей амплитудой колебания профиля поверхности изделия, не превышающей наперед заданного, технологически обоснованного значения микропрофиля поверхности оптической детали.

8. С использованием экспериментально-аналитических методов исследования температуры резания установлено влияние параметров обработки на уровень распространения температуры. Влияние скорости резания на температуру носит экстремальный характер. Уменьшение температуры при высоких скоростях связано со значительной локализацией зоны разрушения, приводящей к уменьшению выделяемого тепла. Кроме того, высокие скорости резания приводят к ярко выраженному хрупкому разрушению композита.

Решена аналитическая задача определения температурных полей в элементах технологической системы при обработке оптических полимеров. Установлен диапазон скоростей резания и подач, которые являются наиболее приемлемыми с точки зрения формирования высокого качества поверхностного слоя оптических изделий.

9. Изучен износ режущих инструментов при обработке полимерных композитов. При резании волокнистых композитов использован критерий технологического износа, так как периоду катастрофического изнашивания инструмента всегда предшествует недопустимое ухудшение качества обработанной поверхности. В этих случаях используют критерий технологического износа. Для режущих инструментов, которые осуществляют обработку оптических материалов, более эффективным показателем изнашивания является величина радиуса округления лезвия инструмента. При обработке волокнистых композитов с абразивным наполнителем износ инструмента происходит благодаря абразивно-механическому изнашиванию. Износ инструмента при резании оптических полимеров протекает за счет хрупкого микроразрушения под действием усталостно-адсорб-

ционных факторов и усиливается адгезионными явлениями.

10. Методом имитационного моделирования проведена оценка состояния поверхностного слоя волокнистых композитов в процессе механической обработки. Последовательность операций, имитирующих на ЭВМ развитие деструкции, предусматривает пошаговое перемещение инструмента, сравнение возникающих в зоне резания напряжений с локальными значениями прочности композита, выключение из работы разрушившихся элементов материала и перераспределение напряжений. Проведена количественная оценка состояния деструктированного слоя стеклопластика.

Разработана экспериментальная методика оценки степени деструкции поверхностного слоя волокнистых и оптических полимерных композитов, базирующаяся на применении электронного парамагнитного резонанса. Показано, что высокие скорости резания и высокая теплопроводность инструментального материала приводят к снижению деструкции материала.

Предложены критерии оценки микропрофиля обработанной поверхности композитов, которые связывают численным соотношением шероховатость (R_z) и длину оптической волны пропускаемого через изделие светового пучка.

11. Проведен комплекс исследований по определению эксплуатационных характеристик изделий из волокнистых и оптических полимерных композитов. Для изделий из волокнистых полимерных композитов по стандартной методике определены характеристики водопоглощения и прочности. Установлено, что максимальными эксплуатационными характеристиками обладают изделия, обработка которых происходила при отсутствии термической деструкции, то есть, как правило, алмазными режущими инструментами в зоне высоких или низких скоростей резания и с минимальными сечениями среза. Установлена взаимосвязь оптических характеристик и долговечности изделий с технологическими параметрами обработки. Показано значительное преимущество нового технологического процесса в сравнении с ранее существовавшим, позволяющим увеличить срок эксплуатации изделий в три раза.

12. Разработана и внедрена автоматизированная система выбора оптимальных параметров обработки изделий, в том числе, и крупногабаритных, из волокнистых полимерных композитов. Система состоит из информационного банка данных, подсистемы оптимизации режимов резания по параметрам максимальной производительности

или минимальной себестоимости и подсистемы формирования и вывода полученных результатов. Создана модель оптимизации параметров резания при прецизионной лезвийной обработке изделий полимерной оптики. В качестве критерия оптимизации служит максимальный объем удаляемого слоя материала. Область ограничений отражает особенности прецизионной обработки и включает характеристики динамической устойчивости технологической системы, параметры начала возникновения термической деструкции и технические характеристики оборудования.

Предложена классификация обрабатываемости полимерных композитов, которая получена по методике исследования микромеханики резания и энергетических параметров процесса обработки.

13. Разработаны практические рекомендации по созданию прогрессивных технологических процессов обработки изделий, в том числе, крупногабаритных, из волокнистых полимерных композитов и оптических полимеров. По данной технологии изготовлена широкая номенклатура изделий из волокнистых композитов и оптических полимеров, опубликованы нормативы режимов резания. Общий экономический эффект представленных разработок составил свыше 1,1 млн.руб. (в ценах 1991 г.).

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Вerezub H.B., Pyzov И.Н. Повышение эффективности процессов обработки неметаллических материалов. - К.: Знание, - 1990. - 20с.

2. Сенчишин В.Г., Вerezub H.B., Лавриненко С.Н. Технология производства полимерных оптических изделий. - К.: Техника, 1992. - 79 с.

3. Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода резцов, сверл и фрез при обработке неметаллических конструкционных материалов (пластмасс) /В.И.Дрожжин, А.И.Грabcенко, В.П.Зубарь, Н.В.Вerezub/. - М.: НИИМаш, 1982. - 144 с.

4. А.С. №1517229. СССР. Многозубый режущий инструмент /Вerezub H.B., Дрожжин В.И., Тараски А.П. /СССР/ - ДСП.

5. А.С. №1663508. СССР. Способ оценки обрабатываемости материалов /Лавриненко С.Н., Вerezub H.B., Крауя У.Э., Калнинь П.П. //Опуб. в Б.И., 1991, №26.

6. А.С. №1630145. СССР. Режущий инструмент /Верезуб Н.В., Садовой С.И., Тараск А.П. /СССР/ - ДСП.

7. А.С. №1814049. СССР. Способ оценки обрабатываемости материалов. /Верезуб Н.В., Садовой С.И., Лавриненко С.Н. //Опубл. в Б.И. 1993, №17.

8. Верезуб Н.В. Создание высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов на основе закономерностей механики разрушения // Развитие процессов резания и холодного пластического деформирования металлов. Сборник научных трудов. - Киев.: ИСМ НАН Украины, 1994.- с.82-87.

9. Верезуб Н.В. Качество обработанной поверхности при алмазном фрезеровании полимерных композиционных материалов. //Резание и инструмент. Респ.межвед.научн.-техн.сборник - Харьков: Вища школа, 1982, - вып.27, - с.68-71.

10. Верезуб Н.В. Процесс вибрационной обработки волокнистых полимерных композитов. //Резание и инструмент. Респ.межвед.научн.-техн.сборник - Харьков: Вища школа, 1993, - вып.48, - с.158-161.

11. Верезуб Н.В. Создание гаммы режущих инструментов для изготовления оптических изделий типа "Tile". //Труды Межд.конф. "Micro CAD-System'93" - Мишкольц, Венгрия, 1993, - с.67.

12. Верезуб Н.В. Разработка эффективных процессов резания волокнистых полимерных композитов. //Резание и инструмент. Респ.межвед.научн.-техн.сборник. - Харьков.: Вища школа, 1992. - вып.46. - с.99-101.

13. Верезуб Н.В. Создание эффективных технологических процессов механической обработки полимерных композитов. Сб.докл.Всесоюз.конф. "Состояние и перспективы использования полимерных материалов в тракторном и автомобильном машиностроении". - Челябинск, 1990. - с.56.

14. Верезуб Н.В. Обеспечение требуемого качества обрабатываемой поверхности полимерных композитов путем управления тепловым балансом при резании. Тез.докл.Всесоюз.конф. "Технологическая теплофизика" - Тольятти, 1988. -с.192-193.

15. Верезуб Н.В. Некоторые физические особенности процесса резания стали и стеклопластика при торцовом фрезеровании. //Резание и инструмент. Респ.межвед.научн.-техн.сборник. - Харьков: Вища школа, 1990, - вып.43. - с.3-13.

16. Верезуб Н.В., Гончаренко И.А. Прогнозирование оптимальных режимов обработки изделий из композитов методом имитационного моделирования процесса резания. Сб. докладов Междунар. конф. "Интертехно'90". - Будапешт, 1990. - т.2. - с.773-781.

17. Верезуб Н.В., Горбатенко П.В., Паценко И.П. Расчет с помощью ЭВМ оптимальных условий обработки крупногабаритных валов торцовым фрезерованием. //Резание и инструмент. Респ.межвед.научн.-техн.сборник. - Харьков: Вища школа, 1983. - вып.30. - с.24-26.

18. Верезуб Н.В., Лавриненко С.Н. Влияние динамических параметров обработки на особенности механики резания полимерных композитов. Тез.докл.Всесоюз.конф. "Интенсификация технологических процессов механической обработки". - Ленинград, ЛМИ, 1986. - с.107.

19. Верезуб Н.В., Лавриненко С.Н. Инструменты для обработки оптических пластмасс. Сб.докл. Междунар.конф. по инструменту. - Мишкольц, Венгрия, 1989. - с.843-849.

20. Верезуб Н.В., Лавриненко С.Н. Методика изучения микромеханики резания полимерных композитов. //Резание и инструмент. Респ.межвед.научн.-техн.сборник - Харьков: Вища школа, 1986, - вып.35. - с.45-48.

21. Верезуб Н.В., Лавриненко С.Н. Особенности разрушения полимерных композиционных материалов при механической обработке. //Механика композитных материалов. -1984. - №4. -с.741-743.

22. Верезуб Н.В., Лавриненко С.Н. Формирование микронеровности обработанной поверхности стеклопластиков в процессе резания. //Резание и инструмент. Респ.межвед.научн.-техн.сборник. - Харьков: Вища школа, 1985. -вып.33. - с.53-58.

23. Верезуб Н.В., Лавриненко С.Н., Садовой С.И. Критерий регулярности микрогеометрии поверхности при лезвийной обработке полимерной оптики. Сб.докл. "Прогрессивные технологические процессы в механосборочном производстве". -М.: Информтехника, 1991. - с.87-88.

24. Верезуб Н.В., Лавриненко С.Н., Солодовник В.Г. Особенности механической обработки высокопрочных композитов. Сб.докл. Междунар.конф. по инструменту. - Мишкольц, Венгрия, 1985. - с.27-29 (венгер.яз.).

25. Верезуб Н.В., Мураш В.С., Солодовник В.Г. Алмазное фрезерование композиционных материалов. Сб.докл. Междунар.

конф. по инструменту. - Мишкольц, Венгрия, 1982. - с.11-21.

26. Везуб Н.В., Садовой С.И. Анализ процесса обработки высокопрочных полимерных композиционных материалов при высокоскоростном фрезеровании. //Резание и инструмент. Респ.межвед.науч.-техн.сборник. - Харьков: Вища школа, 1992. - вып.45. - с.128-132.

27. Везуб Н.В., Садовой С.И. Обработка волокнистых полимерных композиционных материалов с высокими скоростями резания. Сб.докл. "Прогрессивные технологические процессы в механосборочном производстве". - М.: Информтехника, 1991, - с.37-38.

28. Везуб Н.В., Садовой С.И., Гончаренко И.А. Оптимизация режимов резания на микро ЭВМ с использованием системы информационного обеспечения. //Резание и инструмент. Респ.межвед.науч.-техн.сборник. - Харьков: Вища школа, 1989, - вып.42. - с.79-82.

29. Везуб Н.В., Соколов В.И., Лавриненко С.Н. Высокопроизводительное торцовое фрезерование наружных цилиндрических поверхностей крупногабаритных валов из высокопрочных ПКМ. Сб. "Новые конструкции и прогрессивная технология производства инструмента" - М.: 1984. с.351-352.

30. Везуб Н.В., Соколов В.И., Солодовник В.Г. Высокопроизводительная обработка резанием изделий из высокопрочных стеклопластиков. Тез.докл.Всесоюз.конф. "Интенсификация технологических процессов механической обработки" - Л., ЛМИ, 1986. - с.102.

31. Везуб Н.В., Соломкин Г.М. Статистико-вероятностный метод оценки формирования микропрофиля обработанной поверхности стеклопластика. //Резание и инструмент. Респ.межвед.науч.-техн.сборник. - Харьков: Вища школа, 1987. -вып.37. - с.3-7.

32. Высокопроизводительное фрезерование волокнистых полимерных композитов /С.И.Садовой, Н.В.Везуб, Л.Дюбнер, К.Граф //Резание и инструмент, Респ.межвед.науч.-техн.сборник - Харьков: Вища школа, 1993. - вып.48, - с.91-93.

33. Высокоэффективный технологический процесс производства оптических полимерных изделий /И.П.Крайнов, А.И.Грабченко, В.Г.Сенчишин, Н.В.Везуб и др. //Технология машиностроения (Г.Т.) - Будапешт, - 1991. - вып.8-9, -с.345-347.

34. Грабченко А.И., Везуб Н.В. Высокие технологии в ма-

шиностроении - путь к достижению нового уровня функциональных свойств изделий. Тезисы докл. 1 Межд. симпозиума Украинских инженеров-механиков. - Львов, 1993. - с.315.

35. Грабченко А.И., Верезуб Н.В., Островерх Е.В. Прогнозирование качества поверхностного слоя материалов методом имитационного моделирования с использованием ЭВМ. Доклады второй Международной науч.-техн. конф. "Влияние технологии на состояние поверхностного слоя". - Познань, 1993. с.409-411.

36. Дрожжин В.И., Верезуб Н.В., Коротченко В.Л. Природа износа фрез из сверхтвердых материалов. Тезисы докл. Международ. семинара "Сверхтвердые материалы" - Киев, 1991, - т.1, - с.200-201.

37. Дрожжин В.И., Верезуб Н.В., Кравченко Л.С. Температура резания при сверлении и фрезеровании терморезистивных пластмасс. Сб. трудов Мишкольцкого университета - Мишкольц, Венгрия, 1986. - с.44-48.

38. Дрожжин В.И., Лавриненко С.Н., Верезуб Н.В. Особенности механической обработки резанием скнтилляционных полимерных материалов. Тез. докл. Всесоюз. конф. "Состояние и перспективы разработки и применение скнтилляционных детекторов в пятiletке" - Черкассы, 1986. - с.203.

39. Изучение микромеханики процесса резания полимерных композитов методом механолуминесценции /Н.В.Верезуб, У.Э.Крауя, П.П.Калнинь, С.Н.Лавриненко //Механика композитных материалов. - 1991. - №2. - с.296-301.

40. Лавриненко С.Н., Верезуб Н.В., Пап И. Некоторые особенности разрушения полимерных композиционных материалов при резании //Резание и инструмент. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. - Харьков: Вища школа, 1984. - вып.32. - с.15-18.

41. Лавриненко С.Н., Верезуб Н.В., Соломонов В.М. Условия формирования поверхностного слоя полистирола и полиметилметакрилата при точении //Резание и инструмент. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. - Харьков: Вища школа, 1988. - вып.39. - с.27-30.

42. Оценка устойчивости технологической системы при механической обработке оптических изделий. /Н.В.Верезуб, Г.А.Веденин, С.И.Садовой и др. //Тезисы докл. Межд. семинара "Высокие технологии в машиностроении" - Харьков, 1992. - с.18-19.

43. Садовой С.И., Верезуб Н.В. Высокоскоростное фрезеро-

вание волокнистых полимерных композиционных материалов. Сб. докл. Всесоюз. конф. "Состояние и перспективы использования полимерных материалов в тракторном и автомобильном машиностроении". - Челябинск, 1990. - с.76.

44. Садовой С.И., Вerezub Н.В. Оценка шероховатости поверхности композиционных материалов с помощью теоретико-вероятностного анализа //Резание и инструмент. Респ.межвед.научн.-техн.сборник. - Харьков: Вища школа, 1992. - вып.45. - с.10-11.

45. Создание высокоэффективных процессов обработки полимерных композитов на основе закономерностей механики резания /Н.В.Вerezub, С.И.Садовой, С.Н.Лавриненко и др. //Тез. докл. Междунар. научн.-техн.семинара "Проблемы резания материалов в современных технологических процессах". - Харьков, 1991. - с.51-55.

46. Создание организационной системы выбора оптимальных условий механической обработки изделий на основе информационного банка данных и математической модели оптимизации технологических параметров. /А.И.Грабченко, Н.В.Вerezub, В.В.Русанов, Е.В.Островерх //Труды Межд. конф. "Micro CAD-System '92" - Мишкольц, Венгрия, 1992. - т.1. - с.501-502.

47. Тарасюк А.П., Вerezub Н.В. Высокоэффективный инструмент для обработки волокнистых полимерных композитов //Труды Межд.конф. "Новые технологии в машиностроении" - Харьков. 1993. - с.266-268.

48. Test of Long Scintillation Counters for Supercollider Detectors /G.Bellettini, g.Budagov, I.Zaljubovsky, N.Verezub, etc //Solenoïdal Detector Notes - SDC - 53 - 1993, p.1-9.

49. Grabchenko A., Verezub N., Dudas I., Horvath M. High Technologies in manufacture engineering // International conference Results of the Scientific cooperation between the Politechnical University of the Kharkov and University of Miskols. Miskols. 1994, p.31-36.

Анотація

УДК 621.921. Вerezub М.В. Наукові основи вискоелективних процесів механічної обробки полімерних композитів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

по спеціальності 05.03.01 - Процеси механічної обробки, верстати та інструмент. Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1995.

В роботі вперше реалізован комплексний системний підхід для створення наукових основ високоефективних процесів лезвийної обробки надміцних волокнистих та оптичних полімерних композитів на основі закономірностей механіки різання, фізичного та математичного опису процесу обробки, якості поверхневого шара композитних виробів.

Проведено експериментально-теоретичне дослідження механіки різання полімерних композитів на основі утворення закономірностей мікро - та макроруйнування композиційних матеріалів; запропонован новий підхід для розробки елементів технологічної системи. Розроблено основні закономірності процесу різання та формування якості поверхневого шара волокнистих та оптичних полімерних композитів.

Досліджено оптимальні нормативи обробки полімерних композитів; утворено технологічні та технічні рекомендації для реалізації високоефективних методів обробки.

Summary

Nikolai V. Verezub.

"Scientific Principles of High-Effective Processes of Mechanical Machining of Fibre Reinforced Plastics"

An essay of the thesis on competition of technical science doctor's degree on speciality 05.03.01 - The processes of mechanical machining, and tools, Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1995.

The complex systematic approach to the making scientific principles of high-effective processes of fibrous and optical plastic materials was done in the thesis.

The main regularities of mechanical cutting, physical and mathematical description of cutting process and qualities of surface layer of composite tools are in the base of complex approach.

Many experiences of mechanical cutting of composite tools based on the arrangement of regularities of micro - and macrodestruction (of these materials) were conducted. A new

approach to the creation of workshop technologies was offered.

The main regularities of the process of cutting and forming the quality of surface layer of fibrous and optical polymerie composition were determined.

The optimum condition of the machining of fibre reinforced plastics, technical and technological recommendations on realization of high-effective methods of machining were developed.

Ключевые слова: механическая обработка, полимерные композиты, механика резания, динамика процесса резания, качество поверхностного слоя, оптимизация режимов резания.

А.А.

Ротапринт ХНИИТМ Заказ № 40

Подписано к печати 09.11 95 г

Тираж - 120 экземпляров

0811180

AB 33.551