

**Украинский научно-исследовательский институт  
авиационной технологии**

УДК 621.96: 678.6

На правах рукописи

**ЛУПКИН  
Борис Владимирович**

**Научные основы механической обработки  
композиционных материалов, применяемых  
в авиастроении**

Специальность: 05.07.04 - *технология производства  
летательных аппаратов*

Диссертация на соискание ученой  
степени доктора технических наук  
в форме научного доклада

Киев -1997



Украинский научно-исследовательский институт  
авиационной технологии

УДК 621.96: 678.6

На правах рукописи

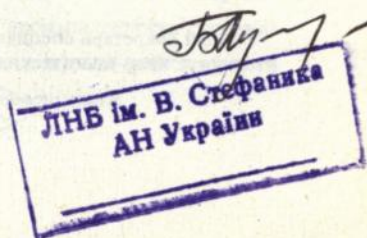
**ЛУПКИН**  
Борис Владимирович

**Научные основы механической обработки  
композиционных материалов, применяемых  
в авиационной промышленности**

Специальность: 05.07.04 - *технология производства  
летательных аппаратов*

Диссертация на соискание ученой  
степени доктора технических наук  
в форме научного доклада

Киев - 1997



059. 7  
Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Украинском  
институте авиационных технологий

ДВ 26.294  
ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760993 (Y)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор  
доктор технических наук,  
профессор  
доктор технических наук,  
профессор

*Крысин Владимир Николаевич*

*Рябовол Альберт Андреевич*

*Гайдайчук Виталий Евгеньевич*

Ведущее предприятие: Киевский механический завод АНТК им. Антонова

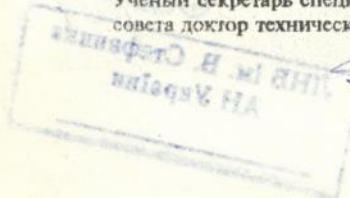
Защита состоится " 6 " марта 199 7 года в 15 часов  
на заседании специализированного совета Д 01.16.01  
при Украинском научно-исследовательском институте  
авиационных технологий (г. Киев, ул. Фрунзе 19/21)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УкрНИИАТ

Автореферат разослан " 5 " февраля 199 7 года

Ученый секретарь специализированного  
совета доктор технических наук

*В.А. Титов*  
В.А. Титов



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время широко применяются в большинстве отраслей машиностроения различные полимерные и металлополимерные композиционные материалы (КМ), объемы и номенклатура которых с каждым годом растут. Основными потребителями выпускаемых и вновь разрабатываемых КМ были и остаются аэрокосмические отрасли машиностроения. Так на основе реализации "Программы развития авиационной промышленности Украины", утвержденной Указом Президента Украины от 03.06.93 г. N 363/3 должен быть организован выпуск современных комфортабельных самолетов, в которых предусматривается существенное использование КМ, обеспечивающих улучшение эксплуатационных характеристик летательных аппаратов за счет снижения массы, обеспечения более высокой термостойкости, большей жесткости и стойкости к усталостным напряжениям.

Снижение массы при использовании КМ в конструкциях современных военных самолетов достигает 20%, для перспективных летательных аппаратов гражданской авиации - 25%, для перспективных военных летательных аппаратов - 35%, а для космических аппаратов - 40%.

При этом, если снижение массы имеет первостепенное значение, рекомендуется применять стекловолокниты, обладающие удельной прочностью в 5-6 раз большей, чем у алюминия. В случае, когда требуется высокая жесткость конструкции, более эффективным является применение композитов на основе углеродных и борных волокон. Композиты на основе арамидного волокна используются в сочетании с углеродным или стекловолокном, что дает оптимальное сочетание снижения массы и обеспечения достаточной жесткости конструкции. Применение композиционных материалов в изделиях приводит к значительному снижению объемов механической обработки. Однако, полностью исключить ее при обработке КМ в настоящее время и в ближайшей перспективе не представляется возможным.

Процессы механической обработки КМ сложные, и в значительной степени отличаются от процессов обработки металлов и поэтому КМ относят к группе труднообрабатываемых материалов. Как следствие этого, широкое внедрение этих материалов в различных отраслях промышленности сдерживается из-за низкой обрабатываемости резанием, недостаточной стойкости инструмента и трудности получения качественной поверхности.

Процессы резания КМ исследовались Исаевым А.И., Семко М.Ф., Егоровым С.В., Дрожжиным В.И., Везубом В.Н., Королевым А.Л., Штучным Б.П., А.Кобаяши, Тихомировым Р.А., Николаевым В.И., Степановым А.А., А.Кенигом и др. Анализ предшествующих исследований и практика применения механической обработки для изготовления изделий из КМ показали, что дальнейшее расширение объемов применения КМ в конструкциях авиакосмической техники в значительной степени зависит от решения проблемы создания научнообоснованных рекомендаций по совершенствованию действующих и разработке новых технологических процессов и средств механической обработки деталей из КМ.

*Цель работы.* Цель работы - это решение научно-технической проблемы повышения эффективности механической обработки КМ, обеспечивающей высокую производительность при изготовлении деталей, требуемое качество и надежность авиакосмических изделий, разработка на основе моделирования процессов резания, теоретических, экспериментальных исследований оптимальных режимов резания и средств для осуществления технологических процессов.

*Методы исследования.* В работе использованы фундаментальные положения теории резания материалов с учетом специфических особенностей технологии производства летательных аппаратов (крупногабаритные, мало-жесткие листовые детали, как правило двойной или тройной кривизны, отсутствие надежных базовых поверхностей), на основе которых предложены новые методические подходы к классификации КМ как объекта обработки резанием. Исследования выполнены с использованием экспериментально-теоретических методов механики твердого деформируемого тела, методов математической статистики, планирования одно- и многофакторного эксперимента, методов математического моделирования, современных физических методов исследования процессов резания. Экспериментальная часть исследований проводилась на модернизированных станках, специально разработанных стендах и установках с использованием современной контрольно-измерительной аппаратуры.

*На защиту выносятся* обобщенные результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором или под его непосредственным руковод-

ством, отраженных в опубликованных трудах соискателя, в отраслевых руководящих технических материалах, представляющих собой в совокупности основы технологии механической обработки композиционных материалов.

1. Методологию классификации и классификатор обрабатываемости полимерных и металлополимерных композиционных материалов, учитывающие влияние физико-механических свойств ПКМ и МКМ на выходные параметры процессов резания, что позволяет существенно сократить объем исследований при определении обрабатываемости новых типов КМ.

2. Математические модели процессов резки, сверления, точения, фрезерования КМ, характеризующие сложные взаимосвязи входных параметров (геометрия режущих частей и конструктивные элементы инструментов, режимы резания, схемы обработки, материал режущей части инструмента, физико-механические характеристики КМ) с выходными параметрами процессов (производительность, технологическая себестоимость обработки, износ и стойкость инструмента, силы резания, качество обработанной поверхности, точность обработки, требование техники безопасности и производственной санитарии).

3. Руководящие технологические материалы по обработке авиационных композиционных материалов (ТР-708-74, ТР-1.4.1187-83, РТМ-1520-75, ТР-1.4.1048-82, РТМ-1.4.401-82, ТР-1.4.1773-87, ТР-1.4.2004-90, РТМ-1.4.1868-88, ОСТ 52288-522289-78, ТР-1.4.1356-84, ТР-17104-90, ТИ-36-34-89, ТР.У.3.001), разработанные по материалам диссертации.

4. Новые прогрессивные технологические процессы и инструменты для механической обработки различных КМ, которые позволили существенно снизить цикл обработки и повысить качество изделий.

5. Средства механизации для механической обработки КМ, реализующие экологически чистые технологические операции механической обработки КМ, и позволяющие повысить уровень механизации ручных работ до 80%, снизить трудоемкость в 1,8 раза и повысить производительность труда в 2,5 раза.

*Достоверность результатов работы.* Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием научнообоснованных методик исследований, применением современной научной аппаратуры, математического аппарата, соответствующих решаемым

задачам, широким внедрением результатов работы в авиационное производство.

**Научная новизна.** Выполнено комплексное системное исследование обрабатываемости особой группы конструкционных полимерных и металлополимерных композиционных материалов, используемых в аэрокосмических летательных аппаратах, отличительной особенностью которого является раскрытие физической сущности процесса резания и влияния физико-механических характеристик КМ и условий их обработки на выходные параметры.

1. Проведен системный анализ и впервые разработана классификация КМ как объекта обработки резанием с учетом ярко выраженной анизотропии механических свойств, низкой теплопроводности и теплоустойкости, деструкции полимерного связующего при резании, повышенной твердости наполнителя и его абразивного воздействия на инструмент и сложности получения высокого качества поверхности. На основе исследования процессов резания КМ с учетом физико-механических характеристик определены коэффициенты обрабатываемости.

2. Разработаны математические модели процессов резки, сверления, точения и фрезерования КМ, на основе которых получены математические зависимости для определения режимов резания, оптимальных геометрических параметров режущей части и конструктивных элементов инструментов.

3. Разработаны новые технологические процессы обработки различных КМ, в том числе заготовок с сотовым наполнителем, которые позволили сократить цикл обработки изделий и повысить их качество.

4. Установлены основные требования к лезвийному и алмазобразивному режущему инструменту, что послужило основой для создания новых конструкций и усовершенствования существующих инструментов, предназначенных для механической обработки различных типов КМ. Новизна разработанных техпроцессов и инструментов подтверждена авторскими свидетельствами и патентами.

5. Созданы способы обработки и механизированные средства, реализующие экологически чистую технологию, даны рекомендации для выбора оптимальных технологических параметров при механической обработке КМ.

**Практическая ценность.** Основным практическим результатом работы является создание отраслевых руководящих технологических материалов по механической обработке конструкционных КМ, способствующих их широкому применению в аэрокосмической промышленности, благодаря реализации вскрытых резервов высокопроизводительной и качественной обработки.

Разработанные технологические процессы механической обработки КМ нашли применение при изготовлении как средних, так и крупногабаритных деталей типа кессонов, панелей крыла, стабилизатора и киля самолетов АН-28, АН-22, АН-70, АН-124, АН-225, створок шасси, створок отсека полезного груза изделия "Буран", в конструкциях которых использованы новые типы стекло-, угле-, органопластиков, имеющие гибридные и интегральные структуры. Обрабатываемость этих материалов была определена впервые.

Разработано 50 наименований ручного механизированного инструмента и 15 наименований типового режущего инструмента.

**Реализация результатов работы.** Разработанные технологические процессы, установки, прогрессивные инструменты внедрены в производство на авиационных, судостроительных и приборостроительных заводах Украины: Киевский Государственный авиационный завод, Киевский механический завод АНТК Антонова, Харьковское Государственное авиационное производственное предприятие, Днепропетровский Южмаш, Павлоградский машиностроительный завод, Запорожский завод "Композит", Закарпатское вертолетное объединение и др., а также на авиационных заводах стран СНГ (авиационные заводы в городах: Москва, Ульяновск, Воронеж, Новосибирск, Иркутск, Улан-Уде, Комсомольск-на-Амуре, Ташкент, Самара, Нижний Новгород и др.). Результаты работы были внедрены на авиационных предприятиях Польши и Чехословакии (в городах Варшава, Мелице, Прага, Угерске градиште и др.), экспонировались на отечественных и международных выставках во Франции, Германии, Италии, Китае, Арабских Эмиратах.

Производство ручного механизированного инструмента было организовано на опытном производстве УкрНИИАТ и Черниговском оптико-механическом заводе.

Результаты работы были отмечены Государственной премией Украины в области науки и техники за 1984 год и Почетной Грамотой Президиума Верховного Совета Украины за 1991 год. За значительный вклад в выпуск конку-

ретноспособной продукции и внедрение изобретений в народное хозяйство автор работы удостоен звания "Заслуженный изобретатель Украины".

*Апробация работы.* Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных, всесоюзных и отраслевых научно-технических конференциях, семинарах, симпозиумах по проблемам производства изделий из КМ, в частности: I Всесоюзная научно-техническая конференция по ротационному резанию металлов (г. Минск, 1970); II Всесоюзная конференция по ротационному резанию металлов (г. Москва, 1974); Третья Международная конференция "Новые технологии в машиностроении" (г. Харьков-Рыбачье, 1994); Первая Всесоюзная конференция "Теория и практика производства деталей из композиционных материалов" (г. Киев, 1988); Вторая Всесоюзная конференция "Технология производства изделий из КМ" (г. Киев, 1991); Международная конференция "Синтетические смолы и пластмассы. Технология производства и применение в отраслях промышленности" (г. Сколе, 1995); Международная конференция "Оснастка-95" (г. Киев, 1995); Республиканская конференция "Технология производства деталей из КМ" (г. Киев, 1992), Республиканская конференция "Конструирование и производство изделий из полимерных и металлических композиционных материалов" (г. Киев, 1993); Международная конференция "Композиционные материалы. Технология и производство" (п. Песчаное, 1994); Республиканская конференция "Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении" (г. Киев, 1994); Международная конференция "Проблемы и перспективы развития сертификации промышленной продукции" (г. Сколе, 1995); Международная конференция "Производство и ремонт машин и механизмов в условиях конверсии" (г. Ялта, 1995); Республиканская школа-семинар "Интенсификация и оптимизация обработки резанием конструкционных материалов" (г. Львов, 1988); Всесоюзная научно-техническая конференция "Проблемы обрабатываемости жаропрочных сплавов резанием" (г. Уфа, 1975); Отраслевое совещание "Создание режущих и измерительных инструментов для серийного производства" (г. Москва, 1971); Отраслевая школа-семинар "Обмен опытом проектирования, изготовления и эксплуатации высокопроизводительного режущего инструмента" (г. Новосибирск, 1975).

*Публикации.* Результаты работы опубликованы в 190 научных трудах. Основу диссертации составляют 55 трудов, среди которых 7 монографий, две

из них изданы в Англии и в Китае; получено 45 авторских свидетельств по теме работы.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация выполнена в форме научного доклада по опубликованным работам и включает общую характеристику работы, основное содержание, общие выводы и рекомендации, список публикаций, содержит \_\_\_\_\_ страниц машинописного текста, 16 рис., 16 таблиц. В проведении исследований по проблеме обрабатываемости КМ под руководством автора участвовали сотрудники УкрНИИАТ, аспиранты и соискатели НТТУ (КПИ), АНТК им. Антонова, а также работники предприятий, которые способствовали внедрению результатов работы в производство.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Цель и задачи исследования.** Последние десятилетия характеризуются применением в промышленном производстве разнообразных композиционных материалов. Основной особенностью КМ является возможность создания элементов изделий с заданными свойствами, наиболее полно отвечающими характеру и условиям работы деталей и конструкций из них. КМ реализуют возможность программирования свойств компонентов, геометрические формы и размеры, взаимное расположение и пр.

Существенный прогресс в использовании композиционных материалов, начатый в конце пятидесятых годов, получил наибольшее развитие в авиационной и аэрокосмической технике. В таблице 1 приведены данные об объемах и эффективности применения деталей из КМ в летательных аппаратах (ЛА). Применение КМ в современных конструкциях ЛА дает существенный выигрыш в массе, прочности, долговечности, коррозионной стойкости и стойкости к агрессивным химическим средам.

Особое место среди КМ занимают композиты с металлической матрицей — металлические КМ (МКМ). Они сочетают достоинства конструкционных металлических материалов с достоинствами композитов вообще. Использование МКМ перспективно в аэрокосмической технике, автомобиле- и судостроении, сельскохозяйственном машиностроении, электронике, приборостроении и др.

Применение композиционных материалов приводит к снижению объемов механической обработки, так как в большинстве случаев процесс получения материалов совмещается с процессом получения изделия. Однако полностью избежать механической обработки или заменить ее каким-либо другим видом обработки в ближайшее время не представляется возможным.

Таблица 1

Рост эффективности применения КМ в изделиях ЛА

Марка ЛА	Фирма	Тип КМ	Кол-во изделий, шт	Площадь, размеры, м, м <sup>2</sup>	Общая масса, кг	Снижение массы, кг, %
F-4	Макдоннел эйркрафт	Эпоксисборопластик				35%
F-15	Макдоннел эйркрафт	Эпоксисборопластик				22%, налет 150000 ч.
F-17	Нортроп	Углепластик	64		408	130 кг
F-18A	Нортроп	Углепластик		40% общей площади	более 1000	10-11% общей массы ЛА
A-4	Дуглас	Эпоксиглепластик		Закрылки, стабилизатор		47% 32%
C-5A L-1011	Локхид	Эпоксисборопластик	79		1134	22%, 800 дет. из металла
B-1	Грумман	Эпоксисборопластик	Горизонтальный стабилизатор 227			15%
F-111	Дженерал дайнемикс	Эпоксисборопластик	Фюзеляж, стабилизатор			25% 18%
T-39A	Норт Америкэн Рокуэл	Эпоксисборопластик	Кессон крыла			37%
B-767	Боинг	Эпоксисборопластик			1550	
Avtek-400	Автек К°	Эпоксисборопластик				70% конструкций из КМ
Ан-28	АНТК Антонов	КМ	90		180	
Ан-22	АНТК Антонов	КМ	430		980	
Ан-124	АНТК Антонов	КМ	1110		5500	
A-300	Аэроспейсл	Углепластик	Киль 45 м <sup>2</sup>			20%
МКС "Шатл"	Норт Америкэн Рокуэл	Эпоксиглепластик	Створки отсека полезного груза			50%
МКС "Буран"	НПО "Молния"	Эпоксиглепластик	2	3,7 x 18,3		50%

Механическая обработка КМ (сверление, фрезерование, резка, точение) в значительной степени отличается от аналогичных операций обработки металлов вследствие специфических особенностей, присущих композитам - ярко выраженная анизотропия свойств, высокая абразивная способность, высокие упругие свойства, низкая теплостойкость и теплопроводность, малая

межслоевая прочность, склонность материалов к раслаиванию и сколам, деформация полимерного связующего при резании с образованием вязкотекучего полимера, являющегося поверхностно активным веществом и др.

Композиционные материалы являются сравнительно новыми материалами, практическое применение которых началось лишь с середины 50-х годов. И до последнего времени при механической обработке КМ зачастую использовались типовые технологические процессы и стандартные режущие инструменты, предназначенные для обработки металлов. Такой подход вызывал чрезмерно большие энергетические затраты за счет использования мощного металлорежущего оборудования и не обеспечивал требуемую стойкость инструмента и качества обработанной поверхности. Поэтому КМ следует рассматривать как особый класс конструкционных материалов. Эффективная обработка КМ и их широкое применение в различных отраслях машиностроения требуют усовершенствования существующих, а также разработки новых технологических процессов и режущих инструментов. Номенклатура применяемых в промышленности КМ весьма разнообразна. Однако исследования обрабатываемости КМ резанием освещены в сравнительно небольшом числе работ, авторами которых являются отечественные и зарубежные ученые (Исаев А.И., Семко М.Ф., Егоров С.В., Дрожжин В.И., Вереzub В.Н., Степанов А.А., Королев А.А., Штучный Б.П., А.Кобаяши, А.Кениг и др.).

В связи с этим для большинства применяемых КМ отсутствовали систематизированные данные по технологии механической обработки, недостаточно была база нормативно-технической документации, позволяющая научнообоснованно выбирать эффективные условия обработки - режимы резания, тип инструмента, материал и геометрические параметры режущей части, тип оборудования. Для этого на основе изучения физических явлений, сопровождающих процесс резания, необходимо выработать общие требования к режущим инструментам и реализовать их в новых конструкциях инструментов и новых технологических процессах механической обработки.

Анализ свойств, состава и структуры КМ позволили автору выделить основные характеристики, по которым материал следует отнести к той или иной группе обрабатываемости. Это, в первую очередь, тип связующего по отношению к нагреву (термопластичный или терморезистивный), тип наполнителя (слоистый, листовой, волокнистый), его физическая природа и свойства,

оказывающие наибольшее влияние на износ инструмента и качество обработки. Механические свойства КМ определяются прочностью армирующих волокон, прочностью, жесткостью и характером деформативности матрицы, а также прочностью связи матрица-волокно. Взаимовлияние этих параметров характеризует механические свойства материала, а также механизм его разрушения.

Различают армирование органическими или неорганическими природными, синтетическими, искусственными материалами. По химической природе они подразделяются на стекловолокниты, стеклопластики, органопластики, углепластики и боропластики, а по структуре на изотропные, трансверсально-изотропные и ортотропные армируемые материалы.

Для изотропных материалов свойства по всем трехосным направлениям одинаковы, для трансверсально-изотропных - только в одной плоскости, а для ортотропных во всех 3-х направлениях они отличаются как по физико-механическим, теплофизическим, так и по технологическим свойствам.

По виду армирующего материала КМ бывают: с непрерывными волокнами, тканями, пряжей, листами, рублеными волокнами.

В зависимости от химической природы связующего (полиэфирного, эпоксидного, фенольного, меламинового, полиамидного, кремний-органического) КМ разделяются на термореактивные и термопластичные, холодного и горячего отверждения, а по способу переработки на: контактного формования, листовые, напыляемые, изготавливаемые пултрузией, намоткой или прессованием.

Металлические КМ по форме наполнителя делятся на нуль-мерные, одномерные и двумерные, по схеме армирования на одноосного, двухосного и трехосного армирования. Наибольшее распространение получили в последнее время полуфабрикаты МКМ, армированные волокнами бора, углерода, стальной проволоки и карбида кремния. На обрабатываемость КМ влияют также схема армирования, технология получения КМ, т.е. намотка, прессование, литье и т.п. Исходя из анализа предшествующих исследований была сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

**Цель** - повышение эффективности механической обработки КМ и обеспечение высокого качества изготовления деталей из КМ при одновременном достижении оптимальных экономических параметров процесса. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

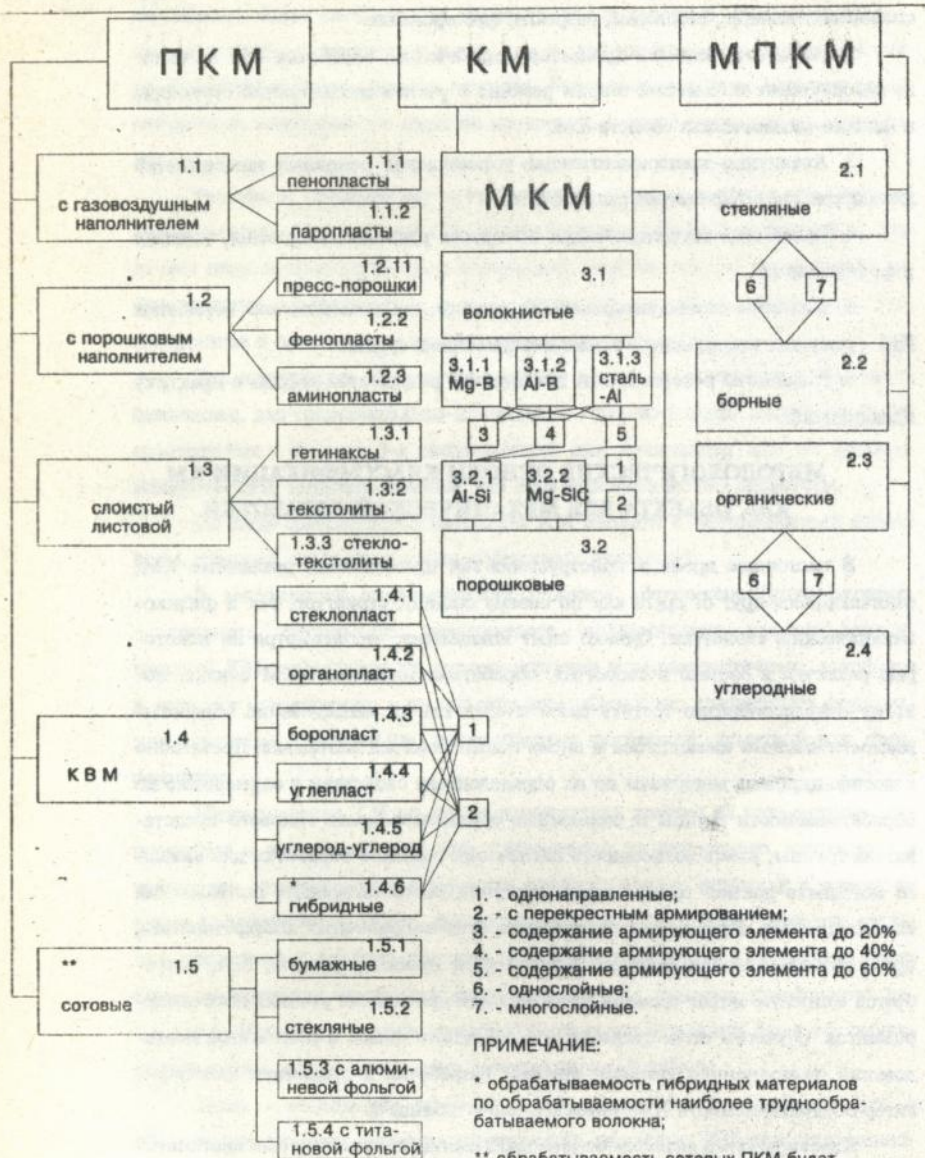
1. Классификация КМ по признаку обрабатываемости механическими способами: точение, сверление, резка, фрезерование.
2. Разработка моделей процессов механической обработки КМ на основе классических положений теории резания с учетом особенностей структуры и физико-механических свойств КМ.
3. Аналитико-экспериментальное установление основных зависимостей для определения параметров резания КМ.
4. Разработка технологических процессов резки, сверления, точения и фрезерования.
5. Создание специализированных средств для механической обработки КМ - режущих инструментов и механизированных средств.
6. Разработка рекомендаций и внедрение результатов работы в практику предприятий.

### **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ КМ КАК ОБЪЕКТА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

В настоящее время в конструкциях ЛА применяются различные КМ, отличающиеся друг от друга как по своему составу, структуре, так и физико-механическим свойствам. Однако опыт показывает, что несмотря на некоторые различия в составе и свойствах, обрабатываемость ряда КМ близка, поэтому нецелесообразно тратить силы и средства на исследование обрабатываемости каждого имеющегося и вновь появляющегося материала. Достаточно классифицировать материалы по их определенным свойствам в одинаковые по обрабатываемости группы и, исследовав обрабатываемость типового представителя группы, иметь возможность назначения режимов обработки для каждого материала данной группы путем введения соответствующих поправочных коэффициентов. Причем для определения этих поправочных коэффициентов, при наличии установленных закономерностей процесса резания КМ, требуется минимум затрат времени и средств для проведения уточняющих экспериментов. С учетом отечественного и зарубежного опыта и результатов исследований, выполненных автором, впервые разработан и предложен классификатор обрабатываемости КМ, приведенный в таблице 2.

Классификатор является основополагающим документом для систематизации теоретических исследований технологических процессов механической

## Классификация КМ по обрабатываемости резанием



обработки изделий из КМ, а также имеет практическое значение при определении места в классификационной группе вновь разрабатываемых видов КМ.

Анализ свойств и состава применяемых в различных отраслях промышленности КМ позволяет выделить основные признаки, по которым следует относить их к той или иной группе обрабатываемости. Это, в первую очередь, физико-механические свойства, отношение связующего к нагреву, то есть какой тип материала - термореактивный или термопластичный, ибо различие в условиях резания этих типов материалов весьма существенно. Далее весьма существенным является тип наполнителя, т.е. каков он по составу - органический, неорганический или металлический, какова его физическая природа и свойства, является ли он волокнистым, листовым или же порошкообразным.

Это основные классификационные признаки. Однако, имеются и менее существенные классификационные признаки, оказывающие влияние на процесс механической обработки. Так, например, для композиционно-волокнистых материалов (КВМ) взаимное расположение волокон, т.е. схема армирования, или технология получения КМ (намотка, прессование, литье и т.п.). Эти особенности должны учитываться в рамках одной классификационной группы, путем дополнительных исследований и введения соответствующих поправочных коэффициентов.

В соответствии с принятыми признаками классификации существующие КМ подразделяются на три класса полимерные композиционные материалы (ПКМ), состоящие из неметаллического наполнителя и полимерного связующего; металлополимерные композиционные материалы (МПКМ), состоящие из наполнителя, полимерного связующего и металлической составляющей, и металлокомпозиционные материалы (МКМ), основным наполнителем которых является металлическая составляющая при отсутствии полимерного связующего, таблица 2.

Класс ПКМ состоит из пяти подклассов обрабатываемости:

подкласс 1.1 с газовоздушным наполнителем. Это различные пенопласты и поропласты;

1.2 - с порошковым наполнителем. Представителями этого подкласса являются такие материалы, как фенопласты, аминопласты, пресспорошок и др.;

1.3 - слоистые с листовым наполнителем. К этому подклассу относятся такие материалы, как гетинаксы, текстолиты и стеклотекстолиты;

1.4 - волокнистые композиционные материалы (ВКМ), наполнителем которых являются различные волокна. Обрабатываемость ВКМ существенно зависит от типа волокнистого наполнителя, т.е. от природы армирующих волокон. Поэтому этот подкласс разделен на ряд групп, определяемых типом волокна. Это такие материалы, как стекло-, угле-, органо- и боропластики, композиции углерод-углерод, а также гибридные материалы. Гибридные материалы содержат в качестве наполнителя не один тип волокна, а два и более, например, стекло-углепластики и т.п. Обрабатываемость КМ определяется наличием наиболее труднообрабатываемого волокна. Так, например, если гибридный КМ содержит стеклянные и борные волокна, то его обрабатываемость, в первую очередь, зависящая от интенсивности износа режущего инструмента, будет определяться наиболее труднообрабатываемым борным волокном.

Поскольку при обработке волокнистых КМ, особенно таких, как органопластики, существенным является схема их армирования, то вышеуказанные группы разделены еще на две подгруппы с однонаправленным и перекрестным армированием.

Подкласс 1.5 - сотовые ПКМ разделяются на группы в зависимости от природы наполнителя: бумажный, стеклянный, алюминиевый или титановая фольга. Обрабатываемость материалов этого подкласса зависит от материала обшивки, поэтому в зависимости от ее вида следует такой ПКМ относить к соответствующему классификационному подклассу.

Класс МПКМ состоит из четырех подклассов обрабатываемости в зависимости от природы армирующего элемента, т.е. от того, какое волокно является армирующим - стеклянное, борное, органическое или углеродное. Поскольку обрабатываемость материалов этого класса зависит и от структуры материала, то каждый из подклассов обрабатываемости разделен на две группы - однослойные и многослойные материалы.

Основные особенности МКМ, определяющие специфику их механической обработки, следующие:

Первая особенность - ярко выраженная анизотропия свойств. Это значит, что на качество получаемой поверхности существенным образом влияет схема укладки волокна, поэтому при разработке технологической операции механической обработки следует выбирать направление обработки с учетом направления армирования.

## Коэффициенты относительной обрабатываемости КМ

Класс	Под-класс	Группа	Компоненты КМ		Типовой представитель обрабатываемого материала	Коэффициент обрабатываемости, к
			Компонент, определяющий обрабатываемость	Наполнитель		
1. ПКМ	1.1.	1.1.1.		Газовоздушный	Пенопласт	1,8
		1.1.2.			Поропласт	2,0
	1.2.	1.2.1.	Древесная мука	Порошковый	Пресспорошок	1,0
		1.2.2.	Порошок		Фенопласт	1,05
		1.2.3.	Крошка		Аминопласт	1,0
	1.3.	1.3.1.	Бумага	Слоистый листовой	Гетинакс	0,9
		1.3.2.	Ткань		Текстолит	0,9
		1.3.3.	Стеклоткань		Стеклотекстолит	
	1.4.	1.4.1.	Стекловолоконное	Волокнистый	Стеклопластик	0,8-0,85
		1.4.2.	Органическое волокно		Органопластик (СВМ)	0,8-0,85
		1.4.3.	Борное волокно		Боропластик	0,6-0,8
		1.4.4.	Углеродное волокно		Углеродпластик (КМУ-8)	0,8-1,0
		1.4.5.	Углеродное волокно		Углеродпластик (КИМФ)	1,0-1,1
		1.4.6.	Сочетание различных армирующих волокон		Гибридные композиции	1,0-1,15
1.5.	1.5.1.	Бумага	Сотовый	Бумага	1,0	
	1.5.2.	Стеклоткань		Стеклопластик	1,0	
	1.5.3.	Алюминиевая фольга		Металл (алюминиевый сплав)	1,0	
	1.5.4.	Титановая фольга		Металл (титановый сплав)	0,8	
2. МПКМ	2.1.	2.1.1.	Стекловолоконное		Композиция алюминий-стеклопластик	0,85-0,9
	2.2.	2.2.1.	Борное волокно		Композиция алюминий-стеклопластик	0,75-0,85
	2.3.	2.3.1.	Органическое волокно		Композиция алюминий-органоластик	0,9-1,0
	2.4.	2.4.1.	Углеродное волокно		Композиция алюминий-углеродпластик	0,85-0,95
3. МКМ	3.1.	3.1.1.	Борное волокно	Алюминиевый сплав	ВКА-2	0,2-0,25
		3.1.2.	Борное волокно	Магнийевый сплав	ВКМ-1	0,2-0,35
		3.1.3.	Стальная проволока	Алюминиевый сплав	КАС-1А	0,25-0,35
		3.1.4.	Углеродное волокно	Алюминиевый сплав	ВКУ-1М	0,5-0,7
	3.2.	3.2.1.	Оксид кремния	Алюминиевый сплав	Al-SiC	0,25-0,4
		3.2.2.	Оксид кремния	Магнийевый сплав	Mg-SiC	0,25-0,4

Вторая особенность - относительная сложность получения высокого качества поверхности, особенно при повышенных температурах, сопутствующих резанию, поскольку из-за пористой структуры и низкой адгезионной связи наполнителя с материалом матрицы и плакирующим слоем между ними могут образоваться трещины, приводящие к расслоению и скалыванию материала.

Третья особенность - абразивное воздействие наполнителя, содержащего борные, стальные, углеродные или другие аналогичные волокна, обладающие высокой твердостью и абразивной способностью. При обработке происходит образование сколов, расслоений, разрушений наполнителя, прижогов. Поэтому для определения допустимого износа инструмента при обработке МКМ учитывают технологический фактор-отсутствие указанных выше дефектов и обеспечение уровня шероховатости поверхности не выше допустимого.

При механической обработке МКМ выделяются мелкие частицы армирующего волокна, плакирующего, присадочного материала и материала матрицы, оказывающие раздражающее и токсичное действие на дыхательные пути и органы зрения человека. Это требует выполнения особых мер по технике безопасности и промсанитарии.

Использование классификатора обрабатываемости позволяет существенно сократить объем экспериментальных исследований для определения обрабатываемости существующих или вновь появляющихся КМ. Новый вид КМ, в зависимости от принятых условий классификации состава, структуры и т.п. достаточно отнести к соответствующей классификационной группе и по минимуму уточняющих экспериментов определить поправочные коэффициенты его обрабатываемости. При наличии нормативно-технической документации определить режимы резания, нормы расхода инструмента и т.п. путем введения найденных экспериментальным путем поправочных коэффициентов.

Коэффициенты относительной обрабатываемости полимерных и металлополимерных КМ приведены в таблице 3.

### **ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБОТКИ ПКМ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

Значительные трудности на производстве вызывает фрезерование ПКМ с сотовым наполнителем.

Особенности структуры ПКМ с сотовым наполнителем, а именно крайне низкая жесткость во всех направлениях, за исключением направления по

нормали к обшивке, требуют специальных приемов для закрепления заготовок, а также создания специализированного инструмента.

Апробированными способами крепления заготовок с сотовыми наполнителями являются: способ крепления замораживанием, крепление к магнитной или вакуумной плите, вспенивающейся клеевой композицией и др.

Исследования процесса резания заготовок с сотовым наполнителем и создание оригинальных режущих инструментов и оборудования позволили разработать новый технологический процесс изготовления изделия из них и существенно сократить цикл обработки и повысить качество. Предложенная схема технологического процесса механической обработки заготовок с сотовым наполнителем приведена в таблице 4.

Автором были разработаны специальные инструменты для обработки сотовых блоков и деталей из заготовок (авт.свид. СССР N 1262823, N1284734, N 1267687, N 1121851).

Был разработан новый техпроцесс, который состоит в следующем: заготовку в виде сотового блока, изготовленного, например, из фольги, устанавливали на столе фрезерного станка. Инструмент в виде режущих дисков наклоняют на угол  $\alpha$  от нормали к обрабатываемому участку и придают ему вращение с частотой 10000-18000 об/мин. Припуск, снятый верхним дисковым ножом, измельчается тарельчатым зубчатым стружколомом и отводится через наклонные окна.

В ряде случаев возникает необходимость в принудительном удалении стружки и пыли из зоны резания. Для этого на обращенной к оправке поверхности дискового ножа выполнены выступы с несимметричными гранями. В процессе обработки эти выступы создают мощный воздушный поток. При этом обеспечивается надежный отвод стружки, а также снижается температура резания. Фрезерование прямолинейных и криволинейных поверхностей сотовых блоков производится дисковыми ножами, изготовленными из стали Р6М5, с использованием следующих режимов:

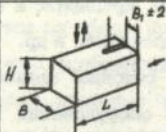

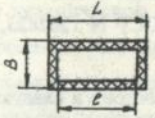
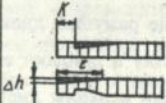

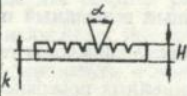
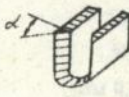
а/ для черновой обработки: скорость  $V = 10-15$  м/с.,

подача  $S = 750$  мм/мин., глубина резания  $t < 10,0$  мм;

б/ для чистовой обработки: скорость резания  $V = 18-26$  м/с.,

подача  $S = 750$  мм/мин., глубина резания  $t = 3-10$  мм.

## Технологический процесс механической обработки сотового заполнителя типа ССП

Технологический процесс	Эскиз и схема обработки	Оборудование	Режущий инструмент	Режимы резания
Резка сотовых блоков		Установка РСБ-1	Пила 400x40x2	$n=1000$ дв.х./мин $S_{\pi}=0,2-0,5$ м/мин
Плоское шлифование сотовых панелей		Модернизированный строгально-рейсмасовый станок DSMA-63	Шлифовальная шкурка или алмазный барабан $\varnothing 160$	$n=3200$ об/мин $S=0,8-1,3$ м/мин $h=0,1-0,5$ мм
Обрезка припуска по контуру		Нож рычажный	Нож лезвийный 400 x 40 x 2 $\gamma=5^{\circ}$	
Шлифование занижений		Универсально-заточной станок 3Б642	Круг абразивный 120 x 30 x 32 или барабан алмазный специальный $\varnothing 80 \times 100$	$n=2400$ об/мин
Снятие скоса		Вертикально-фрезерный станок БР-12	Алмазный отрезной круг 250 x 1,5 x 32	$n=1800$ об/мин $S=0,3-0,5$ м/мин
Вырезка секторов		Универсально-заточной станок 3Б642	Алмазный отрезной круг $\varnothing 125$	$n=2400$ об/мин $S=0,7-1,0$ м/мин
Обработка скосов и занижений на сложных поверхностях		Специальные устройства с приводом от пневматических машин	Шлифовальный барабан $\varnothing 50$	$n=600$ об/мин, подача ручная

Разработанные инструменты позволили повысить качество обработки и стойкость режущего инструмента (в 2-3 раза) по сравнению с нормативной для концевых фрез при обработке ПКМ с соевым наполнителем.

Автором проведен комплекс исследований по выбору рациональных типов и марок инструментальных материалов для механической обработки различных классов КМ. При обработке термореактивных материалов типа термопластиков целесообразно применять в качестве инструментального материала быстрорежущую сталь, так как температура резания в этом случае не должна превышать 200-300 °С, поскольку при более высоких температурах происходит размягчение, выгорание и интенсивная термодеструкция связующего. Режущие инструменты из быстрорежущей стали (сверла, фрезы, метчики и т.п.) можно также успешно применять при обработке термореактивных КМ, не содержащих абразивного наполнителя, например, органопластиков.

С целью изыскания путей повышения режущей способности инструментов из быстрорежущих стали были проведены сравнительные исследования различных методов поверхностной обработки лезвий инструментов - нанесение износостойких покрытий карбидов и нитридов тугоплавких металлов, криогенная обработка, лазерное упрочнение, воздействие магнитным полем, электроискровая обработка, воздействие энергией взрыва и др.

Установлено, что наилучшие результаты по стойкости инструмента и качеству обработки дают инструменты с покрытиями, нанесенными методом КИБ (катодно-ионной бомбардировкой). Выданы рекомендации по определению режимов нанесения покрытий, состава и толщины износостойкого покрытия. Инструменты с покрытиями показали повышение стойкости в 2,0-2,5 раза и улучшение качества обработанной поверхности по сравнению с инструментами без покрытия. По результатам исследований автора были разработаны руководящие технологические материалы по нанесению износостойких покрытий на сверла, фрезы, метчики на установках типа "Булат" (ТР1.4.118783).

При обработке деталей из стекло- и углепластиков наилучшие результаты по стойкости инструмента и качеству обработки были получены с использованием сплавов вольфрамо-кобальтовой группы с невысоким содержанием кобальта ВК2, ВК3М, ВК4, ВК6, ВК8, отличающихся высокой износостойкостью и теплопроводностью.

Резание КМ, имеющих в своем составе борные волокна, твердосплавными инструментами невозможно из-за их быстрого изнашивания, поэтому они обрабатываются поликристаллическими сверхтвердыми инструментальными материалами (ПСТМ), которые являются перспективными при механической обработке всех видов КМ.

Проведенные исследования позволили сформулировать общие требования к режущему лезвийному инструменту из ПСТМ:

- для получения минимального износа инструмента целесообразно применять ПСТМ на основе алмаза; при обработке ПКМ с железоуглеродистым наполнителем лучшие результаты достигаются при использовании ПСТМ на основе кубического нитрида бора;

- следует увеличить главные и вспомогательные задние углы до максимально допустимых, а при стесненных условиях резания увеличивать вспомогательные углы в плане;

- стружечно-транспортирующие канавки из-за налипания стружки и пыли необходимо делать с увеличенным поперечным сечением и полированной поверхностью;

- значительно меньшая, чем при резании металлов, сила резания позволяет проектировать для обработки ПКМ менее прочный инструмент из ПСТМ, чем для обработки металлов, но при этом должна быть обеспечена его достаточная виброустойчивость;

- при изготовлении многокристального инструмента из ПСТМ нежелательны стыки поликристаллов. Между ними следует оставлять перемычки шириной 0,4-1,5 мм. На соседних зубьях поликристаллы и перемычки должны располагаться в шахматном порядке;

- технологические ленточки или фаски на режущих кромках инструмента из ПСТМ должны выполняться шириной не более 10-20 мкм.

Разработанные на базе проведенных исследований рекомендации по выбору инструментальных материалов для операций отрезки, точения, сверления и фрезерования КМ приведены автором в данной работе.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРЕЗКИ КМ

Одной из самых распространенных операций при механической обработке КМ является операция резки и ее разновидности, как то: раскрой

заготовок, обрезка припусков, обрезка по контуру, а также вырезка фигурных окон и т.п. Операции отрезки-разрезки в зависимости от размеров и формы обрабатываемых деталей, характера производства могут осуществляться на металлорежущих станках или с применением ручного механизированного инструмента. Для отрезки-разрезки заготовок разработана гамма оригинальных ручных механизированных инструментов.

При разработке ножиц реализованы прогрессивные идеи ротационного резания. В созданных конструкциях вращение режущей кромки достигается за счет ее формы и соответствующей кинематики, либо за счет вращения дискового инструмента. Эти инструменты создавались на базе разработанной автором теории ротационного резания. Исследовалась кинематика ротационных инструментов, особенности стружкообразования, силы резания, пластические деформации, износ, стойкость инструмента, качество обработанной поверхности и даны рекомендации по выбору режимов обработки.

Доказано, что применение ротационного резания повышает стойкость инструмента на порядок за счет, главным образом, сокращения длины пути резания исследуемой точки режущей кромки. Длина пути режущей кромки (рис.1), в обрабатываемом материале определяется по формуле:

$$L_i = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{r^2 \omega_z^2 + R^2 \omega^2 + R^2 \omega_z^2 T \sin \omega_p - 2RrT\omega_p \omega_z \cos \omega_p \pm 2RrT\omega_z^2 \sin \omega_p \cos \alpha} \cdot dT$$

$$L_i = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{\frac{1}{K^2 \sin^2 \lambda} + 1 - \frac{2 \cos \varphi}{K}} \cdot d\varphi$$

Коэффициент сокращения длины пути резания по сравнению с жесткозакрепленной точкой режущей кромки определяется формулой

$$i = \frac{V}{L_i \cdot n_p} = \frac{2\pi}{K \sin \lambda \cdot \left[ \frac{L_i}{R}(\varphi_1) + \frac{L_i}{R}(\varphi_2) \right]}$$

где  $\varphi$  - угол контакта круглого реза с заготовкой

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \omega_p \cdot T$$

$n_p$  - частота вращения реза;

$\lambda$  - угол наклона режущей кромки;

$R$  - радиус круглого реза;

$K$  - коэффициент, определяющий совершенство узла трения в опоре, выбирается в пределах от 0,6 до 1,25;  
 $\varphi_1$  - угол контакта от глубины резания;  
 $\varphi_2$  - угол контакта от подачи;  
 $\omega_1$  - угловая скорость инструмента;  
 $\omega_p$  - угловая скорость реза;  
 $r$  - радиус реза;  
 $T$  - время.

Были созданы и апробированы ножовки двухстороннего резания, а также фрезы-протяжки с винтовым зубом с новой схемой срезания стружки (а.с. N 1219387) (рис.2). Для реализации предложенной схемы срезания материала размер винтовой стружечной канавки, измеряемый вдоль оси инструмента, выбирается больше толщины обрабатываемой заготовки.

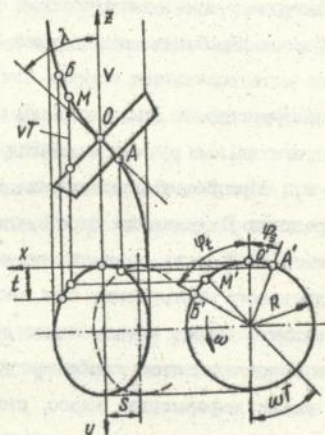


Рис.1 Схема определения длины пути режущей кромки

Заготовка, попадая во впадину винтового зуба, срезается по принципу "ножниц", когда волокна поджимаются к неподвижной режущей втулке. Эксперименты показали, что такой комбинированный инструмент диаметром 6 мм с углом подъема винтовой канавки  $\omega = 65^\circ$ , задним углом  $\alpha = 6^\circ$  и передним углом  $\gamma = 5^\circ$  при обработке органического материала СВМ+ЭДТ69М толщиной до 4 мм со скоростью  $V=47,1$  м/мин. обеспечивает стойкость инструмента равную 38 минутам, в соответствии с технологическим критерием затупления, равным размеру ворсистости не более 0,8 мм. Применение разработанного инструмента, вместо ранее применявшихся шлифовальных кругов, позволило повысить качество резки и снизить на 25-35% затраты на инструмент. Разработанные рекомендации по выбору режимов резания и геометрических параметров режущей части инструмента для операций отрезки приведены в таблице 5.

## Рекомендуемые инструмент и режимы резания при отрезке

Группа	Обрабатываемый материал	Режущий инструмент				Критерий за- тупления $\frac{f_y}{\text{мм}}$	Рекомендуемые режимы резания	
		Марка инструментального материала	Геометрия заточки, градусы				Скорость V, м/мин	Подача S, мм/об
			$\alpha$	$\gamma$	$\omega$			
ПКМ 1.1.1.	Пенопласт (ПЭ-2, К-40)	Углеродистая сталь У8ГА	15-20	5-15	0	0,15	250-500	0,1-1,0
1.1.2.	Поропласт (поролон)	Быстрорежущая сталь Р6М5	-	-	0	0,15	350-800	0,1-1,0
1.2.1.	Пресспорошок	Р6М5, ВК8	10-20	10	0-10	0,2	50-400	0,05-0,3
1.2.2.	Фенопласт (К-18-2)	Р6М5, ВК8	20	10	0-10	0,15	50-600	0,03-0,2
1.2.3.	Аминопласт (МФ)	Р6М5, Р12М5	15-20	8-10	0-15	0,15	40-400	0,05-0,3
1.3.1.	Гетинакс (ПТ)	Р6М5, ВК6, ВК8 ПСТМ	15-20 10-15	8-10 0-5	0-10	0,25	40-600	0,05-0,3
1.3.2.	Текстолит (ПТК)	ВК8, ПСТМ	10-15 10-15	5-10 0-5	0-10	0,35 0,25	80-500 200-800	0,03-0,3
1.3.3.	Стеклотекстолит	Р12М5, ВК2, ВК4 ПСТМ	16-18 10-15	5-10	0-15	0,15	50-400 250-600	0,03-0,3
1.4.1.	Стекловолокно (КАСТ-ВЛ-8)	Р12М5, ВК2, ВК3 ПСТМ	15-25 10-15	5-8 3-5	0-15	0,2 0,15	50-300 200-500	0,03-0,3
1.4.2.	Органопластик (СВМ)	Р12Ф5М, ВК4, ВК8 ПСТМ	15-25 10-15	8-15 3-5	0-15	0,25 0,15	50-250 150-500	0,03-0,3
1.4.3.	Боропластик	ВК6, ВК8 ПСТМ	8-12 20	0-5 0-3	0	0,2 0,15	20-100 150-200	0,02-0,1
1.4.4.	Углеродное волокно (КМУ-8)	Р12Ф5М, ВК6, К8 ПСТМ	10-25 10-15	5-10 0-5	0-10	0,2 0,15	50-300 250-500	0,03-0,2
1.4.5.	Углеродное волокно (КИМФ)	Р12Ф5М, ВК8 ПСТМ	10-15 10-15	5-10 3-5	0-10	0,15	80-300 200-500	0,03-0,2
1.4.6.	Гибридное армирование	Р6М5, Р12Ф2К8М, ВК8: ПСТМ	10-20 10-15	5-10 0-5	0	0,2	50-400	0,03-0,2
1.5.1.	Бумага ПСП-8с	Р6М5, Р12Ф2К8М	3-5	75		0,15	250-1500	0,05-0,3
1.5.2.	Стеклоткань (ТССП-7-10)	ВК2, ВК3, ВК4	3-5	75		0,15	250-1000	0,05-0,3
1.5.3.	Алюминиевая фольга	Р12Ф5М, Р6М5	3-5	75		0,15	250-1200	0,05-0,3
1.5.4.	Титановая фольга	ВК6, ВК8	3-5	65-70		0,15	80-500	0,03-0,2
МПКМ 3.1.	Стеклоянное волокно	ВК2, ВК3 ПСТМ	10-15 10-12	5-10 0-5		0,2	50-500 100-1000	0,03-0,2
3.3.	Органическое волокно	Р6М5	6-12	5-10		0,2	150-600	0,08-0,3
3.4.	Углеродное волокно	Р6М5	6-12	5-12		0,2	150-600	0,05-0,3

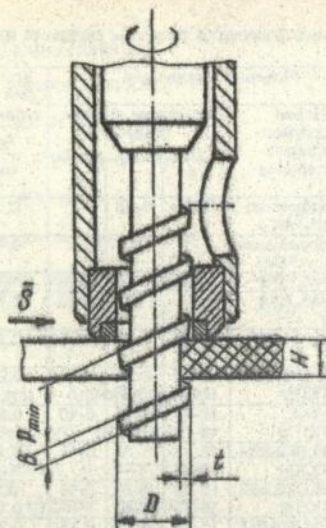


Рис.2. Схема устройства для резки КМ с цилиндрическим винтовым инструментом

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ КМ

Наиболее трудоемкой и распространенной операцией при обработке КМ является операция сверления. При ее выполнении необходимо обеспечить точность отверстия в пределах 11-12 качества и требуемые параметры шероховатости обработанной поверхности, исключив сколы и выпучивания на входе и выходе сверла из отверстия.

Исследования процесса сверления отверстий в однородных и смешанных материалах осуществлялось сверлами из быстрорежущей стали, твердого сплава и ПСТМ.







Определение оптимальных значений геометрических параметров режущей части проводилось методом однофакторного и многофакторного эксперимента при сверлении сквозных отверстий. Результаты этих исследований представлены в таблице 6, а рекомендуемая форма заточки режущей части представлена в таблице 7.

Таблица 6

## Рекомендуемые инструмент и режимы резания при сверлении КМ

Группа	Обрабатываемый материал	Режущий инструмент				Критерий затупления $\lambda_z$ , мм		Рекомендуемые режимы резания		
		Марка инструментального материала	Геометрия заточки, градусы				НПЛ	ПКР	Скорость V, м/мин	Подача S, мм/об
			2φ	γ	α	α <sub>1</sub>				
ПКМ	Пенопласт (ПЭ-2, К-40)	Углеродистая сталь У8ГА	90	15	20	25	0,1-0,2	0,1-0,2	90-180	0,1-1,5
1.1.2.	Поропласт (паролон)	Высортрежущая сталь Р6М5	-	-	-	-	0,1-0,15	0,1-0,15		
1.2.1.	Пресспорошок	Р6М5, ВК8	90	10	20	25	0,15-0,3	0,22-0,7	60-100	0,1-0,6
1.2.2.	Фенопласт (К-18-2)	Р6М5, ВК8	90	10	20	25	0,15-0,4	0,22-0,4	80	0,1-0,6
1.2.3.	Аминопласт (МФ)	Р6М5, Р12М5	90	10	20	25	0,15-0,2	0,1-0,25	60-100	0,1-0,6
1.3.1.	Гетинакс	Р6М5, ВК6, ВК8 ПСТМ	90	10 15	25	25	0,12-0,15	0,2-0,25	90-120	0,1-0,6
1.3.2.	Текстолит (ПТ, ПТК)	ВК8, ПСТМ	90	15	25	25	0,12-0,15	0,2-0,25	90-120	0,05-0,4
1.3.3.	Стеклотекстолит	Р12М5, ВК2, ВК4 ПСТМ	90	10	25	25	0,15-0,4	0,25-0,6	60-100	0,03-0,3
1.4.1.	Стекловолокно (КАСТ-ВЛ-8)	Р12М5, ВК2, ВК3 ПСТМ	100	15	20	25	0,15-0,25	0,25-0,4	30-70	0,03-0,3
1.4.2.	Органоластик (СВМ)	Р12Ф5М, ВК4, ВК8	70-90	10	20	25	0,12-0,25	0,18-0,40	90-120	0,06-0,4
1.4.3.	Боропластик	ВК6, ВК8 ПСТМ	105	10	20	25	0,30		22	0,03-0,3
1.4.4.	Углеродное волокно (КМУ-8)	Р12Ф5М, ВК6, К8	90-100	5-8	20	25	0,12-0,2		50-80	0,03-0,6
1.4.5.	Углеродное волокно (КИМФ)	Р12Ф5М, ВК8 ПСТМ	90-100	5-8	20	25	0,12-0,2		50-80	0,03-0,6
1.4.6.	Гибридное армирование	Р6М5, Р12Ф2К8М, ВК6; ПСТМ	90-110	5-8	20	25	0,12-0,2		50-80	0,03-0,6
1.5.1.	Бумага ПСП-8с	Р6М5, Р12Ф2К8М		20-25	15-20	-		0,10-0,20	90-120	0,03-0,15
1.5.2.	Стеклоткань (ТССП-7-10)	ВК2, ВК3, ВК4		20-25	15-20			0,10-0,20	90-120	0,03-0,15
1.5.3.	Алюминиевые сети	Р12Ф5М, Р6М5		20-25	15-20			0,10-0,20	90-120	0,03-0,15
1.5.4.	Титановые сети	Р12Ф5М, ВК8		15-20	15-20			0,15-0,25	60-100	0,03-0,15
МКМ 3.1.	Стеклоанное волокно	Р6М5, ВК6, ВК8	90	5-10	15-20		0,15-0,40	0,15-0,20	50-80	0,05-0,3
3.3.	Органическое волокно	Р6М5, Р12М5 ВК2, ВК6	90	5-10	15-20		0,12-0,25	0,12-0,25	50-80	0,05-0,3
3.4.	Углеродное волокно	Р12Ф5М, ВК3М, ВК8	90	5-10	15-20		0,12-0,30	0,12-0,30	50-60	0,05-0,3
2.1.1.	Металлический лист	Р6М5, Р12Ф5М	90	5-10	18		0,15	0,15	50-80	0,05-0,3
2.2.1.	Металлический лист	Р6М5, Р12Ф5М	100	5-8	18		0,15	0,15	30	0,03-0,3
2.3.1.	Металлический лист	Р6М5, Р12Ф5М	90	5-10	18		0,12-0,25	0,12-0,25	50-80	0,05-0,3
2.4.1.	Металлический лист	Р6М5, Р12Ф5М	90	5-10	18		0,12-0,30	0,12-0,30	50-80	0,05-0,3

## Рекомендуемые формы заточки сверл

Инструментальный материал	Форма режущей части	Эскиз заточки режущей части	Рекомендации по применению
Быстро-режущая сталь	Спиральная с нормальной заточкой		Стекло- и углепластик
	Спиральная с двойной заточкой		
	Спиральная с подрезающими кромками		Стекло- и углепластик, глухие отверстия
Твердый сплав	Спиральная с нормальной заточкой		Стекло-, угле- и боропластик
	Спиральная с двойной заточкой		
	Спиральная с подрезающими кромками		Стекло-, угле- и боропластик, глухие отверстия

Существенно повысить качество обработки можно за счет использования сверл специальной конструкции с подрезающими кромками. Однако известные конструкции спиральных сверл с подрезающими режущими кромками получили ограниченное применение в практике. Это в значительной степени объясняется тем, что не были разработаны эффективные технологические способы заточки таких инструментов, которые позволяли бы в широких пределах менять величины геометрических параметров режущей части.

Разработаны способы заточки спиральных, а также перовых сверл с подрезающими режущими кромками по фасонным поверхностям вращения, которые обеспечивают получение на сверле целесообразных величин задних углов на всей длине режущих кромок, требуемых величин угла наклона поперечной кромки, и принятой формы режущих кромок. Схемы сверл с подрезающими кромками показана на рис.3.

В результате анализа геометрии задней поверхности были выведены зависимости для расчета формы профиля фасонного круга, параметров наладки сверло-заточного оборудования, исходя из заданной геометрии режущей части рассматриваемых сверл.

Геометрия режущей части пластин перовых сверл с подрезающими кромками рассчитывалась по следующей методике в соответствии со схемами, представленными на рис.4-6.

Векторы, касательные к задней плоскости:

$$\vec{P} = -\vec{j} \cdot \sin \beta + \vec{k} \cdot \cos \beta;$$

$$\vec{P} = -\vec{i} \cdot \sin \psi + \vec{j} \cdot \cos \psi$$

$$\vec{P} = -\vec{i} \cdot \cos \alpha_n - \vec{j} \cdot \sin \alpha_n \cdot \cos \beta - \vec{k} \cdot \sin \alpha_n \cdot \sin \beta$$

Вектор скорости резания:  $\vec{V} = \vec{i} \cdot \cos \mu + \vec{j} \cdot \sin \mu$

Векторы нормалей к задней  $\vec{N}_z$ , передней  $\vec{N}_n$  и поверхности резания

$\vec{N}_p$ , где  $-\vec{N}_n = 1$ ;

$$\vec{N}_z = [\vec{P} \times \vec{V}] = \vec{i} \cdot \sin \alpha_n - \vec{j} \cdot \cos \alpha_n \cdot \cos \beta - \vec{k} \cdot \cos \alpha_n \cdot \sin \beta$$

$$\vec{N}_p = [\vec{P} \times \vec{V}] = \vec{i} \cdot (\sin \mu \cdot \cos \beta) + \vec{j} \cdot \cos \mu \cdot \cos \beta + \vec{k} \cdot \sin \beta \cdot \cos \mu$$

Статический задний угол  $\alpha_N$  в нормальном к кромке сечении АВ определяется:

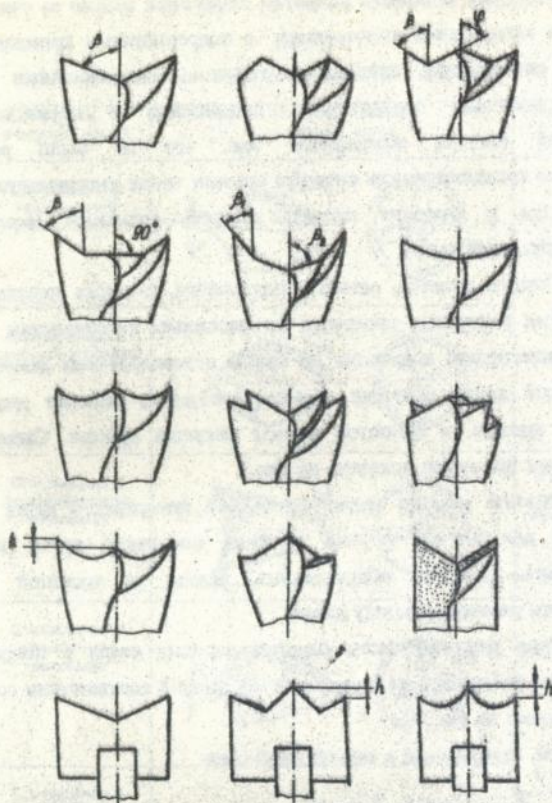


Рис.3. Схемы сверл с подрезающими кромками

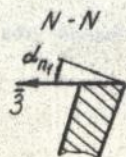
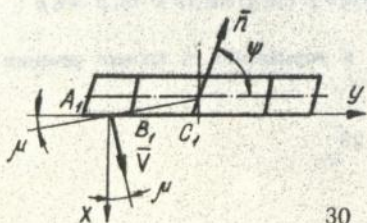
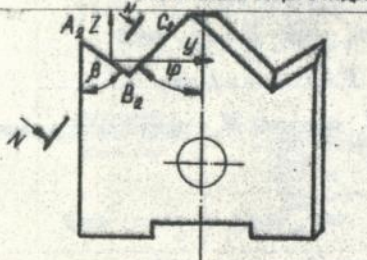


Рис.4. Схема для расчета геометрических параметров первого сверла



$$\operatorname{tg} \alpha_N = \frac{[\bar{N}_p \times \bar{N}_s]}{(\bar{N}_p \cdot \bar{N}_s)} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{N_1} - \operatorname{tg} \mu \cdot \cos \beta}{\operatorname{tg} \mu \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_{N_1} + 1} = \operatorname{tg}(\alpha_{N_1} - \tau)$$

$$\operatorname{tg} \tau = \operatorname{tg} \mu \cdot \cos \beta$$

Статический передний угол  $\gamma_N$  в нормальном к кромке сечении АВ определяется:

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \frac{(\bar{N}_p \cdot \bar{N}_s)}{[\bar{N}_p \cdot \bar{N}_N]} = \operatorname{tg} \mu \cdot \cos \beta$$

Передний угол  $\gamma_{N_1}$  и задний угол  $\alpha_{N_1}$  в нормальном к кромке сечении ВС:

$$\operatorname{tg} \gamma_{N_1} = \operatorname{tg} \mu \cdot \cos \varphi;$$

$$\alpha_{N_1} = \alpha_n + \tau;$$

$$\operatorname{tg} \tau_2 = \operatorname{tg} \mu \cdot \cos \varphi$$

Нормаль к задней поверхности  $\bar{N}_s$  на кромке ВС:

$$\bar{N}_s = \bar{i} \cdot \sin \alpha_s + \bar{j} \cdot \cos \alpha_s \cdot \cos \varphi - \bar{k} \cdot \cos \alpha_s \cdot \sin \varphi$$

Угол наклона  $\psi$  поперечной кромки:

$$(\bar{N}_s \cdot \bar{n}) = 0;$$

$$-\sin \alpha_s \cdot \sin \psi + \cos \alpha_s \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi = 0$$

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{ctg} \alpha_s \cdot \cos \varphi$$

Геометрия задней поверхности сверл с подрезающими кромками определяется следующим образом.

Векторы, касательные к задней поверхности на периферии сверла:

$$\bar{P} = -\bar{j} + \bar{k} \cdot \operatorname{tg} \varphi;$$

$$\bar{F} = -\bar{i} \cdot \cos \mu - \bar{j} \cdot \sin \mu - \bar{k} \cdot \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\bar{Z} = \bar{i} \cdot \cos \rho - \bar{j} \cdot \sin \rho + \bar{k} \cdot \operatorname{tg} \alpha_r$$

$$\bar{T} = \bar{i}(\operatorname{tg} \eta \cdot \sin \alpha_r \cdot \cos \rho + \sin \rho) + \bar{j} \cdot (\cos \rho - \operatorname{tg} \eta \cdot \sin \alpha_r \cdot \sin \rho) - \bar{k} \cdot \operatorname{tg} \eta \cdot \cos \alpha_r;$$

$$([\bar{P} \times \bar{Z}] \cdot \bar{T}) = 0$$

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 & \operatorname{tg} \varphi \\ \cos \rho & -\sin \rho & \operatorname{tg} \alpha_r \\ (\operatorname{tg} \eta \cdot \sin \alpha_r \cdot \cos \rho + \sin \rho) & (\cos \rho - \operatorname{tg} \eta \cdot \sin \alpha_r \cdot \sin \rho) & -\operatorname{tg} \eta \cdot \cos \alpha_r \end{vmatrix} = 0$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} \eta \cdot \cos \rho + \sin \alpha_r \cdot \sin \rho}{\cos \alpha_r}$$

$$([\vec{P} \times \vec{F}] \cdot \vec{F}) = 0$$

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 & \operatorname{tg} \varphi \\ \cos \rho & -\sin \rho & \operatorname{tg} \alpha_r \\ -\cos \mu & -\sin \mu & -\operatorname{tg} \alpha \end{vmatrix} = 0$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha_r \cdot \cos \mu - \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin(\mu + \rho)}{\cos \rho}$$

$$\text{По построению: } \sin \alpha_r = \frac{K - 0,5 \cdot D \cdot \sin(\mu + \rho)}{L}$$

где  $D$  — диаметр сверла.

Определение угла наклона поперечной кромки  $\psi$  производили следующим образом:

Векторы, касательные к задней поверхности в точке В

$$\vec{A} = \vec{i} + \vec{k} \cdot \operatorname{tg}(\eta + 2\varepsilon);$$

$$\vec{B} = \vec{j} - \vec{k} \cdot \operatorname{tg} \delta;$$

$$\vec{C} = \vec{i} + \vec{j} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \rho);$$

$$([\vec{C} \times \vec{B}] \cdot \vec{A}) = 0$$

$$\begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg}(\psi + \rho) & 0 \\ 0 & 1 & -\operatorname{tg} \delta \\ 1 & 0 & \operatorname{tg}(\eta + 2\varepsilon) \end{vmatrix} = 0$$

$$\operatorname{tg}(\psi + \rho) = \frac{\operatorname{tg}(\eta + 2\varepsilon)}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\operatorname{tg}(\eta + 2\varepsilon) \cdot \sqrt{L^2 - K^2}}{K}$$

$$\text{По построению: } \sin \delta = \frac{K}{L}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{K}{\sqrt{L^2 - K^2}}$$

Заточка сверла с подрезающими кромками.

$$\text{По построению: } \sin \alpha_r = \frac{K - 0,5 \cdot D \cdot \sin(\mu + \rho)}{L}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} \eta \cdot \cos \rho + \sin \alpha_r \cdot \sin \rho}{\cos \alpha_r};$$

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \alpha_r - \sin \alpha_r \cdot \sin \rho}{\cos \rho};$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha_T \cdot \cos \mu - \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin(\mu + \rho)}{\cos \rho};$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\operatorname{tg}(\eta + 2\varepsilon) - \sin \delta \cdot \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\eta + 2\varepsilon) \cdot \operatorname{tg} \rho + \sin \delta};$$

$$\text{где } \sin \delta = \frac{K}{L}; \quad r = \frac{0,25 \cdot D \cdot \cos \mu}{\sin \eta}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{K}{\sqrt{L^2 - K^2}}$$

Для первых сверл с подрезающими режущими кромками определены геометрические параметры их режущей части, профили шлифовальных кругов, используемых при заточке, параметры наладки сверло-заточного оборудования. Исследование стойкости быстрорежущих и твердосплавных сверл при обработке КМ проводили методами одно- и многофакторного эксперимента. Пределы варьирования факторов выбирались из априорной информации. Математической обработкой результатов экспериментов получены зависимости для расчета скорости резания:

$$V_{ca} = \frac{C \cdot d^x}{T^m \cdot S^y}, \quad (\text{м/мин}),$$

где  $T$  – период стойкости инструмента, мин.

$d$  – диаметр сверла, мм

$S$  – подача на оборот, мм/об

$C$  – коэффициент, зависящий от условий обработки.

Значение коэффициента  $C$  и степенных показателей  $x, y, m$  приведены в таблице 8.

Таблица 8  
Значение коэффициента  $C$  и показателей степени  $x, y, m$  при сверлении

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал	$C$	$x$	$m$	$y$
Гетинакс	P6M5 / BK8	51/2220	1,26/1,20	1,15/0,78	0,46/0,43
Текстолит	P6M5 / BK8	65/2770	1,26/1,20	1,15/0,78	0,46/0,43
Стеклотекстолит	P6M5 / BK8	10,4/125	0,60/1,16	0,66/1,24	0,34/0,98
Стеклопластик	P6M5 / BK8	12,6/106	0,14/1,30	0,60/0,08	0,28/0,93
Асбестоцемент	P6M5 / BK8	34/900	0,46/1,20	0,46/1,05	0,20/0,38
Боропластик	BK8	0,59	0,76	0,58	0,38

Экспериментальные исследования и опытное апробирование показали, что на процесс сверления существенное влияние оказывают высокие упругие свойства КМ. В связи с этим при обработке КМ наблюдаются увеличение

площади контакта и повышенные значения сил трения на задних поверхностях и ленточке инструмента, усадка размеров просверленного отверстия. Для достижения требуемой точности диаметр сверла следует выбирать на 0,1-0,2 мм больше диаметра отверстия, а с целью снижения усилий резания, действующих на заднюю поверхность и ленточку инструмента принимать увеличенные до 20-25° задние углы и создавать на кромке ленточки вспомогательные задние углы  $\alpha_1 = 6-8^\circ$ .

На основании проведенного комплекса исследований выданы рекомендации по выбору формы заточки, геометрических параметров сверл и режимов обработки при сверлении различных типов ПКМ (табл.6).

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ КМ ТОЧЕНИЕМ.

Токарные операции при обработке КМ на основе стекло-, угле- и органопластиков рекомендуется проводить твердосплавными резцами. Используются при этом вольфрамсодержащие твердые сплавы группы ВК: ВК2, ВК3М, ВК4, ВК6М, ВК8. Тип и марка твердого сплава оказывает существенное влияние на стойкость инструмента. По литературным данным коэффициент стойкости для сплавов ВК8 равен 1,0, для сплавов ВК3М и ВК2 1,7, для сплавов ВК4 и ВК6М - 1,4, а для сплавов Т15К6 - 0,25.

Исследование износа и стойкости резцов, оснащенных пластинками ВК8, проводилось методами одно- и многофакторного эксперимента. Опыты показали, что на стойкость резцов и качество обработанной поверхности большее влияние оказывают главный задний угол  $\alpha$ , передний угол  $\gamma$ , углы в плане  $\phi$  и  $\phi_1$ , вспомогательный задний угол  $\alpha_1$ , радиус при вершине резца  $r$ .

Разработанные рекомендации по выбору геометрических параметров резцов и границы изменения режимов резания приведены в таблице 9.

По сравнению с обработкой металлических конструкционных материалов при обработке КМ задние углы назначают увеличенными до 20-25°, это объясняется повышенной вязкоупругостью КМ. Величина переднего угла  $\gamma$  зависит от свойств инструментального материала. При

## Рекомендуемые инструмент и режимы резания при точении КМ

Группа	Обрабатываемый материал	Режущий инструмент					Критерий затупления $h'_y$ , мм	Рекомендуемые режимы резания		
		Марка инструментального материала	Геометрия заготовки, градусы					Скорость V, м/мин	Подача S, мм/об	Глубина T, мм
			$\gamma$	$\alpha = \alpha_1$	$\phi$	$\phi_1$				
ПКМ	Пенопласт (ПЭ-2, К-40)	Углеродистая сталь У8ГА	10-15	15-20	45	45	0,11-0,15	100-250	0,5-1,0	0,5-5,0
1.1.1.	Поропласт (поролон)	Р6М5	10-15	25	45	0	0,11-0,15	150-300	0,5-1,0	0,5-1,0
1.2.1.	Пресс-порошок	Р6М5, ВК8	8-12	15-20	45	15	0,15-0,20	100-250	0,1-0,4	0,5-4,0
1.2.2.	Фенопласт (К-18-2)	ВК3М, ВК15ХОМ	5-10	20	45	15	0,15-0,20	150-500	0,1-0,4	0,5-4,0
1.2.3.	Аминопласт (МФ)	Р6М5, Р12Ф5М	10-20	15-20	45	15	0,15-0,25	40-110	0,1-0,25	0,5-4,0
1.3.1.	Гетинакс	ВК8, ПСТМ	8-12	20	45	12	0,15-0,25 0,10-0,15	80-350	0,1-0,4	0,5-4,0
1.3.2.	Текстолит (ПТ, ПТК)	Р12Ф5М, ВК8, ПСТМ	8-12	15-20	45	12	0,15-0,25 0,10-0,15	60-500	0,1-0,4	0,5-4,0
1.3.3.	Стекло-текстолит	ВК2, ПСТМ	5-8	25	45	15	0,15-0,20 0,10-0,25	60-600	0,1-0,4	0,5-3,0
1.4.1.	Стекловолокно (КАСТ-ВЛ-8)	ВК2, ВК3М, ПСТМ	5-8	25	45	15	0,20-0,30 0,10-0,65	60-500	0,1-0,4	0,5-5,0
1.4.2.	Органоластик (СВМ)	ВК8, ПСТМ	10	20	45	45	0,20-0,30 0,15-0,25	50-300	0,1-0,3	0,5-2,0
1.4.3.	Воропластик	ВК2, ВК3М, ВК8, ПСТМ	5-8	10-15	45	12	0,25-0,50 0,15-0,25	40-300	0,05-0,15	0,5-1,0
1.4.4.	Углеродное волокно (КМУ-8)	ВК8, ПСТМ	8-12	20	45	15	0,20-0,30 0,10-0,25	100-400	0,05-0,30	0,5-3,0
1.4.5.	Углеродное волокно (КИМФ)	ВК8, ПСТМ	8-12	20	45	15	0,20-0,30 0,10-0,25	100-400	0,05-0,30	0,5-3,0
1.4.6.	Гибридное армирование	ВК8, ПСТМ	8-12	20	45	15	0,20-0,30 0,10-0,25	100-400	0,05-0,30	0,5-3,0
1.5.1.	Бумага ПСП-8с	Р6М5, Р12Ф5М	-	-	-	-	-	-	-	-
1.5.2.	Стеклоткань (ТССП-7-10)	ВК2, ВК3, ВК4	-	-	-	-	-	-	-	-
1.5.3.	Алюминиевая фольга	Р12М5, Р6М5	-	-	-	-	-	-	-	-
1.5.4.	Титановая фольга	Р12Ф5М, ВК8	-	-	-	-	-	-	-	-
МПКМ	Стеклопластиковое волокно	Р12Ф5М, ВК8	8-10	15-20	45	45	0,25	50-300	0,05-0,25	-
3.1.	Борное волокно	ВК3М, ВК6, ПСТМ	5-8	15-18	45	15	0,35 0,25	80-200 300	0,03-0,30	-
3.2.	Органическое волокно	Р12М5, ВК8	8-10	20-25	45	45	0,25	50-300	0,10-0,30	-
3.3.	Углеродное волокно	Р12Ф5М, ВК8	8-10	15-20	45	25	0,25	50-300	0,05-0,30	-
3.4.										

обработке быстрорежущими инструментами передние углы назначаются увеличенными ( $\gamma = 10 - 20^\circ$ ) по сравнению с твердосплавными резами ( $\gamma = 5 - 12^\circ$ ). При обработке ПСТМ, обладающими повышенной хрупкостью, рекомендуемые передние углы  $\gamma$  находятся в пределах  $0 - 5^\circ$

Углы в плане  $\phi$  рекомендуется выбирать возможно меньшей величины, чтобы обеспечить обработку резанием без вибрации. Для достижения безвибрационных условий обработки рекомендуется выбирать угол в плане в пределах  $\phi = 40 - 45^\circ$ .

Математической обработкой результатов экспериментов получены зависимости для расчета скорости резания при применении твердосплавных резов

$$V_{\text{рок}} = \frac{C}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \quad (\text{м/мин})$$

Величины  $C, m, x, y$  для различных обрабатываемых КМ и инструментальных материалов приведены в таблице 10.

Таблица 10

Постоянные и показатели степени для расчета скорости резания при точении

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал	$C_1$	$C_2$	$y$	$x$	$m$
Оргстекло	ВК8			0,38	0,33	0,45
Винипласт	ВК8			0,74	0,37	0,58
Гетинакс	ВК6М	3,24	90,0	0,80	0,55	0,55
Текстолит	ВК8	4,04	1148,0	0,56	0,70	0,10
Стеклотекстолит	ВК2	2,61	58,8	0,18	0,09	0,66
Стеклопластик конструкционный	ВК8	4,3	81,5	0,49	0,38	0,37
Органопластик	ВК8	2,13	2,74	0,31	0,04	0,18
Углепластик		3,52	8,35			
Борэпластик		1,48	0,75			

## ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБОТКИ КМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

Фрезерование КМ используется для прорезки пазов, вырезки окон, канавок и обработки контуров, образующих поверхности деталей из КМ.

На основании исследований были определены режимы резания и величины геометрических параметров при фрезеровании стекло- и углепластиков (таблица 11).

Зависимость для определения скорости фрезерования от режимов резания выражается формулой:

Таблица 11

Рекомендуемые инструмент и режимы резания при фрезеровании КМ

Группа	Обрабатываемый материал	Режущий инструмент					Критерий затупления $\gamma_{\text{з}}$ , мм	Рекомендуемые режимы резания	
		Марка инструментального материала	Геометрия заточки, градусы					Скорость $V$ , м/мин	Подача $S$ , мм/зуб
			$\gamma$	$\alpha$	$\varphi$	$\varphi_1$			
ПКМ	Пенопласт (ПЭ-2, К-40)	Углеродистая сталь У8ГА	15-20	20-25	45	0	0,15	100-500	0,5-1,0
1.1.1.	Поропласт (поролон)	Быстрорежущая сталь Р6М5	20-25	25-30	45	0	0,15	300-600	0,5-1,5
1.2.1.	Пресспорошок	Р6М5, ВК8	10-12	18-20	45	0-10	0,2	250-500	0,05-0,3
1.2.2.	Фенопласт (К-18-2)	Р6М5, ВК8	10-12	18-20	45	0-10	0,2	250-500	0,05-0,3
1.2.3.	Аминопласт (МФ)	Р6М5, Р12М5	10-12	18-20	45	0-10	0,2	250-500	0,05-0,3
1.3.1.	Гетинакс	Р6М5, ВК6, ВК8 ПСТМ	10-12 0-5	18-20 18	45	0-10	0,2-0,35	80-750	0,05-0,2
1.3.2.	Текстолит (ПТ, ПТК)	ВК8, ПСТМ	8-10 0-5	18-20 18	45	0-10	0,2 0,35	100-650	0,05-0,2
1.3.3.	Стеклотекстолит	Р12М5, ВК8 ПСТМ	8-10 0-5	18 18	45	0-10	0,3 0,35	80-600	0,05-0,15
1.4.1.	Стекловолокно (КАСТ-ВЛ-8)	Р12М5, ВК8 ПСТМ	8-10 0-5	18-20 18	45	0-10	0,3 0,25	60-600	0,05-0,15
1.4.2.	Органопластик (СВМ)	Р12Ф5М, ВК6, ВК8	8-10 0-5	18-20 20	45	0-10	0,3 0,25	80-450	0,05-0,15
1.4.3.	Боропласт	ВК8 ПСТМ	8-10 0-(-5)	15-20 15	45	0-10	0,35 0,25	25-250	0,03-0,2
1.4.4.	Углеродное волокно (КМУ-8)	Р12Ф5М, ВК8 ПСТМ	8-10 0-5	18-20 18	45	0-10	0,20 0,25	50-500	0,03-0,3
1.4.5.	Углеродное волокно (КИМФ)	Р12Ф5М, ВК8 ПСТМ	8-10 0-5	18-20 18	45	0-10	0,20 0,25	50-500	0,03-0,3
1.4.6.	Гибридное армирование	Р12М5, ВК8: ПСТМ	8-10 0-5	18-20 18	45	0-10	0,2 0,25	50-500	0,03-0,3
1.5.1.	Бумага ПСП-8с	Р6М5, Р12М5	70-80	3-8	-	-	0,15	250-1500	0,05-0,5
1.5.2.	Стеклоткань (ТССП-7-10)	ВК2, ВК3, ВК4	70-80	3-8	-	-	0,15	250-1500	0,05-0,3
1.5.3.	Алюминиевая фольга	Р12М5, Р6М5	70-80	3-8	-	-	0,15	200-1500	0,05-0,3
1.5.4.	Титановая фольга	Р12Ф5М, ВК6	65-70	5-10	-	-	0,25	150-800	0,05-0,2
МКМ	Стекловолокно	Р6М5, Р12Ф5М ВК6, ВК8	8-10 5-8	15-20 15-18	45	0-10	0,25 0,20	50-300	0,05-0,25
3.1.	Борное волокно	ВК2, ВК3, ВК4 ПСТМ	5-8 0-5	15-18 15-18	45	0-10	0,35 0,25	80-200 150-300	0,03-0,35
3.2.	Органическое волокно	Р6М5, Р12М5 ВК2, ВК6	8-10 5-8	20-25 18-20	45	0-10	0,15 0,20	50-350	0,1-0,3
3.3.	Углеродное волокно	Р12Ф5М, ВК3М, ВК8	8-10 5-10	15-20 15-18	45	0-10	0,15 0,2	50-300	0,05-0,3

- для инструментов из быстрорежущей стали

$$V_{фр.} = \frac{C_1 \cdot D^{0,35}}{T^{0,33} \cdot f^{0,42} \cdot S^{0,15}} \quad (\text{м/мин});$$

- для инструментов из твердого сплава

$$V_{фр.} = \frac{C_2 \cdot D^{0,05}}{T^{0,5} \cdot f^{0,19} \cdot S^{0,12}} \quad (\text{м/мин}).$$

Так как на практике физико-механические свойства обрабатываемого ПКМ зависят от технологии получения материала и технологических условий механической обработки, то для определения фактической скорости резания  $V$  расчетные значения следует умножить на поправочные коэффициенты в зависимости от марки инструментального материала  $K_n$ , принятой стойкости инструмента  $K_T$ , технологических условий (например, относительной ширины фрезерования  $K_{B/D}$  и т.д.). Значения коэффициентов установлены экспериментальным путем и в случае использования инструмента из ПСТМ приведены в таблице 12. Поправочные коэффициенты для определения скорости фрезерования в зависимости от стойкости инструмента и марки инструментального материала приведены в таблицах 13 и 14.

Таблица 12

Поправочные коэффициенты при торцовом фрезеровании КМ инструментами со вставками из ПСТМ

Период стойкости инструмента, T, мин	Отношение ширины фрезерования к диаметру фрезы B/D	Конструктивный стаблогластик	Стекло-текстолит	Боропластик	Коэффициенты стойкости	
					$K_T/K_n$	$K_B/K_n$
480	0,8	1,20/1,00	1,15/1,00	1,00/1,00		
720	0,7	1,00/1,11	1,00/1,10	0,80/1,04		
960	0,6	0,47/1,26	0,38/1,16	0,50/1,08		
1200	0,5	0,25/1,45	0,25/1,23	0,25/1,14		
1440	0,4	0,16/1,70	0,15/1,35	0,18/1,21		
1680	0,3	0,12/1,95	0,11/1,55	0,12/1,32		

Таблица 13

Поправочные коэффициенты ( $K_T$ ) для расчета скорости резания в зависимости от стойкости инструмента при фрезеровании КМ

Вид фрезерования	Фрезы быстрорежущие					Фрезы твердосплавные			
	Период стойкости T, мм								
	60	90	120	180	240	240	300	350	420
Дисковое фрезерование	1,0	0,87	0,79	0,69	0,82	1,0	0,89	0,82	0,75
Концевое фрезерование	1,0	0,81	0,70	0,57	0,49	1,0	0,73	0,56	0,45
Торцовое фрезерование	1,0	0,81	0,70	0,57	0,49	1,0	0,89	0,81	0,75

Поправочные коэффициенты ( $k_{ch}$ ) для расчета скорости резания в зависимости от марки инструментального материала при фрезеровании КМ

Вид фрезерования	Сталь быстрорежущая			Твердый сплав				
	P6M5	P9	P12	ВК4	ВК6	ВК8	T15K6	T6K10
Дисковое фрезерование	1,0	1,2	1,3	1,0	0,80	0,60	0,65	0,55
Концевое фрезерование	1,0	1,2	1,3	1,0	0,75	0,55	0,50	0,45
Торцовое фрезерование	1,0	1,2	1,3	1,0	0,80	0,60	0,55	0,50

Фрезерование органических полимеров существенно отличается от обработки стекла и углеродистых полимеров и требует создания специальных режущих инструментов, так как стандартные фрезы в большинстве случаев оказываются непригодными из-за их низкой стойкости и неудовлетворительного качества обработанной поверхности.

В разработанных новых конструкциях концевых фрез для обработки листовых ПКМ была реализована идея создания такого процесса стружкообразования, при котором усилия резания на торцевых поверхностях заготовки были бы направлены в середину обрабатываемого материала, за счет создания на режущих кромках, обрабатывающих торцевые участки, различных по направлению, но равных по абсолютной величине углов наклона. В связи с этим была разработана специальная фреза с чередующимися зубьями, имеющая криволинейные и прямолинейные режущие кромки (рис.7).

С целью оценки режущей способности концевой фрезы и обоснования выбора формы передней и задней поверхностей аналитически исследованы геометрические параметры режущей части фрезы в инструментальной и кинематической системах координат, проведен анализ нагружения режущей части.

В результате экспериментальных исследований были получены математические модели процесса фрезерования КМ, характеризующие зависимости сил резания и шершавости обработанной поверхности от девяти входных параметров и на их основе определены рекомендуемые режимы резания и геометрические параметры режущей части концевых фрез.

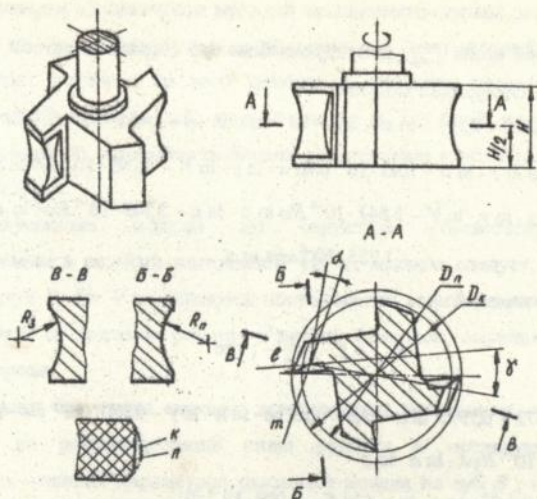


Рис. 7. Фреза с чередующимися прямолинейными и криволинейными зубьями

Анализ и обработка экспериментальных данных позволили получить модели процесса резания для прямолинейного и криволинейного зубьев фрезы при встречном фрезеровании органопластика поперек армирующих волокон. В качестве выходной функции приняты результирующие силы резания  $F_{np}$  и  $F_{zp}$ , действующие на зубья фрезы.

Для прямолинейного зуба математическая модель имеет вид:

$$\ln F_{np} = 6,201 - 2,205 \cdot 10^{-2} fV + 3,028 \cdot 10^{-2} f^2 VS + 2,475 \cdot 10^{-2} t \ln R - \\ - 1,048 \cdot 10^{-3} \gamma \ln \alpha + 5,613 \cdot 10^{-7} \gamma fV^2 + 3,266 \cdot 10^{-7} \alpha V + 7,265 \cdot 10^{-5} \alpha_2 - \\ - 3,594 \cdot 10^{-6} \gamma V \ln S - 1,779 \cdot 10^{-6} \alpha^2 f^2 V + 8,3 \cdot 10^{-7} f^3 V \ln S$$

После преобразования модель приобретает следующий вид:

$$F_{np} = C \frac{S^x \cdot t^y}{V^z}, \text{ где}$$

$$C = \exp(6,201 - 1,048 \cdot 10^{-3} \gamma \ln \alpha + 7,265 \cdot 10^{-5} \alpha^2);$$

$$x = 3,028 \cdot 10^{-2} f^2 \cdot VS / \ln S + 8,3 \cdot 10^{-7} \alpha^2 f^3 V$$

$$y = 2,475 \cdot 10^{-2} t \ln R / \ln t$$

$$z = V \cdot (2,205 \cdot 10^{-2} f - 6,613 \cdot 10^{-7} \gamma - 3,266 \cdot 10^{-7} \alpha + \\ + 3 / 564 \cdot 10^{-6} f \cdot \gamma \cdot \ln S + 1,779 \cdot 10^{-6} \alpha^2 \cdot f^3) / \ln V$$

Для суммарной силы  $F_{\text{ср}}$ , действующей на зуб с криволинейной режущей кромкой, получена следующая модель:

$$\begin{aligned} \ln F_{\text{ср}} = & 5,372 + 0,199f \ln \alpha - 2,27 \cdot 10^{-2} \ln \alpha \ln \gamma \varphi + 1,455 \cdot 10^{-2} \lambda S t^2 \lambda + \\ & 2,697 \cdot 10^{-4} S^2 \varphi \ln \gamma \cdot \ln \alpha - 5,42 \cdot 10^{-4} \varphi \ln \alpha \cdot \ln \gamma \cdot \ln V - 4,099 \cdot 10^{-4} \lambda f \ln S + \\ & + 1,24 \cdot 10^{-6} \alpha \varphi \ln^2 \alpha \cdot \ln \gamma \cdot \ln V - 5,847 \cdot 10^{-6} R \varphi \ln \alpha \cdot \ln \varphi - 3,349 \cdot 10^{-7} R \varphi \lambda \ln \alpha \cdot \ln \varphi - \\ & - 1,955 \cdot 10^{-6} \alpha \varphi t \ln \alpha \end{aligned}$$

или после преобразований:

$$F_{\text{ср}} = C \frac{S^x \cdot t^y}{V^z}, \text{ где}$$

$$\begin{aligned} C = & \exp(5,372 + 0,199f \ln \alpha - 5,847 \cdot 10^{-2} \varphi \cdot \ln \alpha \cdot \ln \gamma - 5,847 \cdot 10^{-6} R \varphi \cdot \ln \varphi - \\ & - 3,349 \cdot 10^{-7} R \varphi \lambda \cdot \ln \alpha \cdot \ln \varphi \end{aligned}$$

$$x = 2,697 \cdot 10^{-4} S^2 \varphi \ln \alpha \cdot \ln \gamma / \ln S - 4,099 \cdot 10^{-4} t \lambda;$$

$$y = t(1,455 \cdot 10^{-2} \lambda S t f - 1,955 \cdot 10^{-6} \alpha \varphi \ln \alpha) / \ln t;$$

$$z = \varphi \ln \alpha \cdot \ln \gamma (5,423 \cdot 10^{-4} - 1,24 \cdot 10^{-6} \alpha \cdot \ln \alpha)$$

Была также синтезирована модель влияния геометрических параметров лезвия инструмента и режимов резания на величину  $H$  несрезанных волокон на наружной поверхности заготовки. Математическая модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \ln H = & -2,121 - 0,3311t \ln S + 7,857 \cdot 10^{-2} VS + 2,154 \cdot 10^{-2} \varphi f - \\ & - 1,078 \cdot 10^{-4} f \lambda \ln S - 2,25 \cdot 10^{-3} \gamma \ln \alpha + 2,443 \cdot 10^{-5} \alpha \lambda VS t \ln S + \\ & + 1,011 \cdot 10^{-6} \gamma \lambda V^2 S^3 t \ln R \cdot \ln S - 1,26 \cdot 10^{-2} f VS t \cdot \ln^2 S + \\ & + 3,59 \cdot 10^{-4} \gamma t \ln S - 1,116 \cdot 10^{-7} \alpha V^2 S^3 t^2 \ln R \cdot \ln S \end{aligned}$$

после преобразования:

$$H = C \frac{S^x \cdot t^y}{V^z}, \text{ где}$$

$$C = -2,121 + 2,154 \cdot 10^{-2} \varphi f - 2,25 \cdot 10^{-3} \gamma \ln \alpha;$$

$$x = 3,59 \cdot 10^{-4} \gamma \cdot t \cdot f - 1,116 \cdot 10^{-7} \alpha \lambda V^2 S^3 t^2 \ln R + 7,857 \cdot 10^{-2} VS / \ln S;$$

$$y = t(1,011 \cdot 10^{-6} \alpha \lambda V^2 S^3 \cdot \ln R \cdot \ln S - 0,311 \cdot \ln S) / \ln t$$

$$z = V \ln S(1,078 \cdot 10^{-4} \lambda f + 1,26 \cdot 10^{-2} f S t \ln S) / \ln V$$

Проверка адекватности моделей экспериментальным данным позволила принять их за исходные для проведения по ним исследования влияния переменных факторов на силу резания и величину несрезанных волокон, установления взаимосвязей между ними, и на этой основе разработке рекомендаций по совершенствованию конструкции и условиям эксплуатации концевых фрез.

Полученные модели по структуре соответствуют моделям, используемым в резании материалов. Из их анализа следует, что показатели степени при  $S$ ,  $t$  и  $V$  не являются постоянными величинами, а изменяются в зависимости от режимов резания и других факторов, определяющих условия работы фрезы.

Анализ структуры силовых зависимостей показывает, что наибольшее влияние на результирующие силы резания в исследуемом диапазоне изменения входных параметров оказывает подача на зуб  $S$ , глубина резания  $t$ , задний угол  $\alpha$  и величина превышения диаметра криволинейных зубьев по отношению к диаметру прямолинейных зубьев, характеризуемая величиной фаски  $f$  обработанной поверхности детали и передний угол  $\gamma$ . В меньшей степени на силу резания влияют скорость резания  $V$ , радиус фрезы  $R$ , угол в плане  $\varphi$  и угол наклона режущей кромки  $\lambda$  (рис.8-10).

При обработке органоластика в диапазоне подач  $S$  от 0,01 до 0,8 мм/зуб кривые зависимости  $F_{кр} = \hat{f}(S)$  и  $F_{пр} = \hat{f}(S)$  имеют экстремальный характер с точкой минимума в районе подач  $S = 0,1$  мм/зуб. При дальнейшем увеличении  $S$  сила резания заметно возрастает. Наличие точки минимума кривой или участка, параллельного оси абсцисс, объясняется тем, что при малых значениях толщины среза, определяемого подачей  $S$ , большое влияние на напряжения и деформации в срезаемом слое оказывает радиус скругления режущей кромки  $\rho$ . Поэтому обработка органоластика в диапазоне подач меньше 0,05 мм/зуб является нецелесообразной. Увеличение минимально допустимой подачи до  $S = 0,05$  мм/зуб обусловлено особенностями физико-механических свойств органоластиков, и прежде всего, их высокой упругостью.

Величина несрезанных волокон  $H$  обрабатываемого материала, согласно модели, определяется в первую очередь режимами обработки  $S$ ,  $V$ ,  $t$ , а также углом в плане  $\varphi$ , углом наклона режущей кромки  $\lambda$  и задним углом  $\alpha$ .



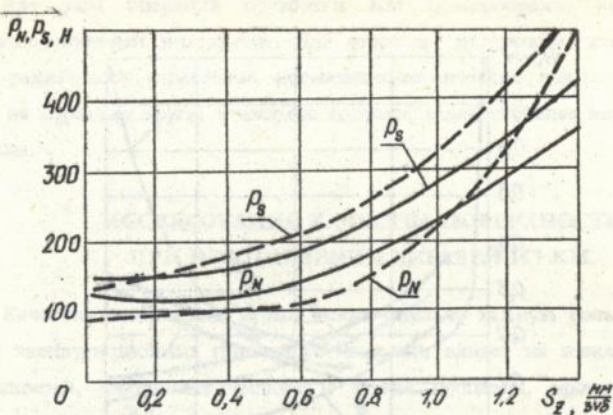


Рис.9. Графики зависимости силы отжата  $P_N$  и силы подачи  $P_S$  от величины подачи  $S_z$  при фрезеровании стеклотекстита  
 ———— - попутное фрезерование  
 - - - - - встречное фрезерование

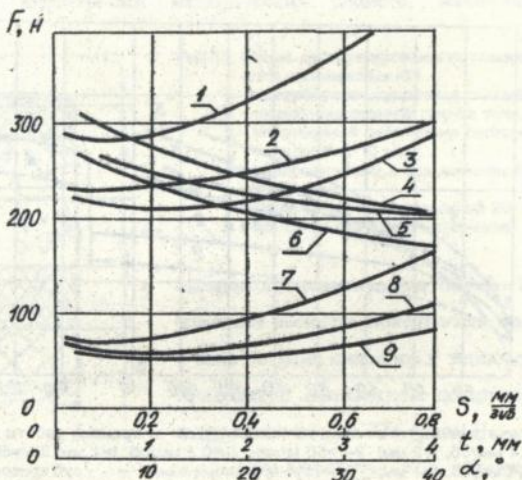


Рис.10. Графики зависимости результирующей силы резания от подачи, глубины резания заднего угла и величины фаски (1- $F_{rp} = f(t, \alpha = 5^\circ)$ , 2- $F_{rp} = f(S_z)$ , 3- $F_{rp} = f(t, \alpha = 20^\circ)$ , 4- $F_{rp} = f(\alpha, \gamma = 5^\circ)$ , 5- $F_{rp} = f(t)$ , 6- $F_{rp} = f(\alpha, \gamma = 5^\circ)$ , 7- $F_{rp} = f(S_z)$ , 8- $F_{rp} = f(t)$ , 9- $F_{rp} = f(\alpha)$ )

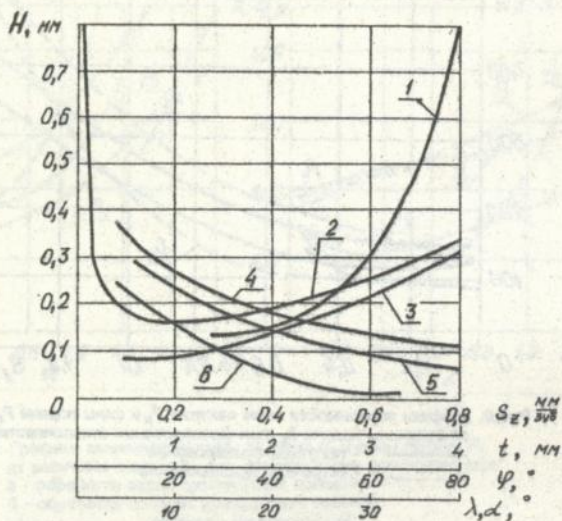


Рис. 11. Графики зависимости высоты несрезанных волокон от подачи, глубины резания, угла в плане, заднего угла и угла наклона режущей кромки (1- $H=f(\varphi)$ , 2- $H=f(S_z)$ , 3- $H=f(t)$ , 4- $H=f(\alpha, \gamma=5^\circ)$ , 5- $H=f(\alpha, \gamma=5^\circ)$ , 6- $H=f(\lambda)$ )

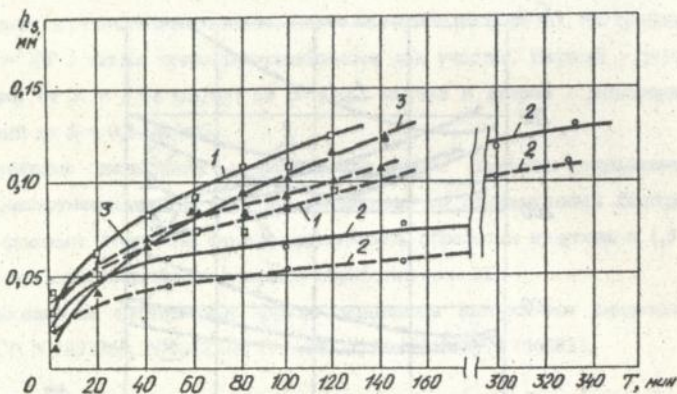


Рис. 12. Графики зависимости величины износа фрезы от времени работы (1- $V=50$  м/мин,  $S_z=0,4$  мм/об,  $t=2$  мм; 2- $V=50$  м/мин,  $S_z=0,1$  мм/об,  $t=1$  мм; 3- $V=50$  м/мин,  $S_z=0,4$  мм/об,  $t=1$  мм; — - зуб прямолинейный, - - - - - зуб криволинейный)

Для ряда операций обработки КМ целесообразно использовать алмазно-абразивный инструмент. Для этого по результатам исследований были разработаны отраслевые нормативно-технические документы (РТМ, ОСТ) на отрезные круги, зачистные головки, шлифовальные круги, пыльно-ножовки.

### ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КМ.

Качество поверхности играет исключительно важную роль в обеспечении эксплуатационных показателей изделий, влияет на износ трущихся поверхностей, зарождение трещин и другие процессы, протекающие на поверхности изделия и в прилегающем слое. В процессе изготовления и эксплуатации изделия на поверхности возникают неровности, изменяется структура, химический состав, что приводит к изменению физико-химических и эксплуатационных свойств изделий. Поверхностный слой оказывает влияние на эксплуатационные свойства изделий: прочность, трение и износ, диэлектрические показатели, влагопоглощение и т.п. Что касается КМ, обладающих специфическими свойствами из-за своей структуры, анизотропии механических свойств, наличия армирующих

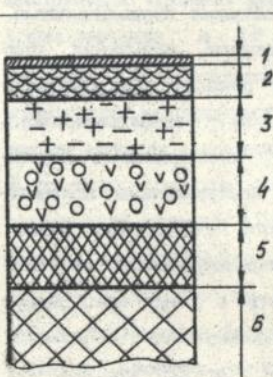


Рис.13. Схема деструктированного поверхностного слоя волокнистых КМ

- 1 - адсорбированная пленка толщиной менее 1 мкм;
- 2 - модифицированная пленка толщиной 0.05-1 мкм;
- 3 - уплотненный собственно деструктированный слой толщиной 5-10 мкм;
- 4 - раздробленный и разрыхленный слой толщиной 10-30 мкм;
- 5 - переходный слой толщиной 20-100 мкм;
- 6 - исходная структура материала

элементов, механическая обработка существенно изменяет свойства поверхностного слоя. Наличие в зоне резания силового и теплового воздействий приводят к неизбежной деструкции полимеров, входящих в состав КМ (рис.13).

При обработке КМ образуется микропрофиль поверхности, зависящий от структуры материала и режимов обработки. Как показывает

опыт, влияние механической обработки на показатели качества поверхности изделий из КМ носит комплексный характер, например, шероховатость поверхности влияет на прочностные характеристики, влагопоглощение и другие показатели качества изделий. При обработке резанием армированных композиционных материалов с матрицей из полимерного материала достигаемое качество поверхности является функцией ориентации волокон относительно режущей кромки инструмента и, соответственно, угла между направлением резания и направлением волокон. На рис.14 показана характеристика контакта врезания при обработке армированных материалов, волокна которых расположены поперечно к продольной оси заготовки. При этом положение угла  $\alpha = 0^\circ$  является позицией, при которой плоскость слоев во время врезания находится в направлении скорости резания или, соответственно, вертикально к базовой плоскости инструмента.

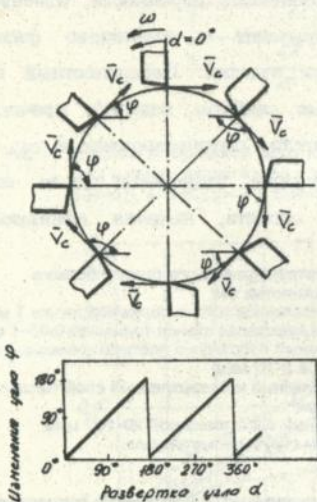


Рис.14 Схема изменения угла врезания при обработке резанием армированных материалов с учетом положения угла по времени при вращении заготовки

Для процесса резания изменение угла врезания  $\varphi$  в качестве угла между направлением волокон в обрабатываемой детали и направлением скорости резания или, соответственно, усилия резания в направлении окружного усилия, является закономерным и обладает периодичностью. Производственные испытания при продольном резании армированного стекловолокном композиционного материала поликристаллическими алмазными инструментами показали на окружности приближенно синусоидальные параметрические значения шероховатости с двумя ярко выраженными максимумами в положении углов  $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha = 225^\circ$  (рис.15).

Увеличение шероховатости с возрастанием подачи инструмента в процессе резания в обеих позициях больше, чем по остальной окружности. В тех областях, где армирующие волокна во время процесса резания

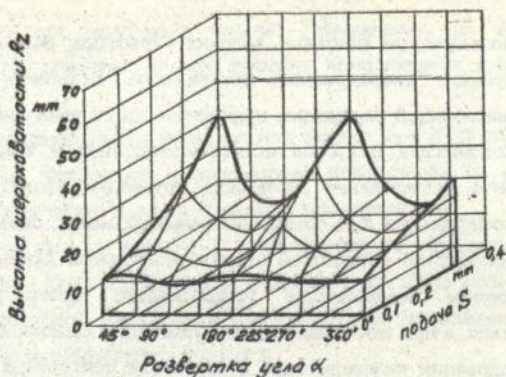


Рис. 15 Усредненная высота шероховатостей в зависимости от подачи режущего инструмента и величины развертки угла ( $V=50$  м/мин,  $S=0,2$  мм/об)

расположены параллельно ( $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 180^\circ$ ) или перпендикулярно ( $\alpha = 90^\circ$  и  $\alpha = 270^\circ$ ) по отношению к направлению резания, наблюдается значительно меньшая шероховатость. Лучшее качество имеет поверхность на участках с величиной угла  $\alpha = 135^\circ$  и  $\alpha = 315^\circ$ . На этих участках шероховатость лишь незначительно превышает теоретическую расчетную, которая обуславливается относительным движением находящегося в состоянии врезания режущего инструмента. Причина высоких характеристик шероховатости на участках с углом врезания  $\alpha = 45^\circ$  заключается в нечетком разделении материала, которое обуславливается подавляющими сжимающей нагрузкой и изгибающим напряжением к началу процесса резания. Эта нагрузка вызывает разлом частичек поверхности и разрыв отдельных волокон и пучков волокон. В противоположность этому при угле между направлением резания и ориентацией волокон в  $\alpha = 135^\circ$  материал испытывает в начале процесса резания преобладающую растягивающую нагрузку, оказывающую положительное воздействие на механизм разделения волокон. Эти взаимосвязи имеют принципиальное значение и могут быть применены и к другим способам обработки, например, сверлению и фрезерованию, причем следует учитывать соответствующие характерные для данного способа параметры резания.

Шероховатость поверхности является одной из основных характеристик поверхности, поэтому для каждого КМ необходимо проведение

исследований, позволяющих назначать условия обработки, обеспечивающие получение требуемого микропрофиля поверхности. Возможны два пути установления зависимостей параметров шероховатости от режимов обработки и других технологических факторов экспериментальный и теоретический. Экспериментальное исследование достаточно трудоемко, однако с учетом применения классификации КМ объем исследований может быть сокращен. Наиболее целесообразной обработкой экспериментальных данных является при однофакторном эксперименте использование интерполяционного полинома Лагранжа, а при многофакторном - уравнение линейной регрессии.

При исследовании шероховатости поверхности конкретных видов КМ основными факторами являются: скорость резания, подача и глубина резания. Характерные зависимости параметров шероховатости от режимов резания приведены на рис.16.

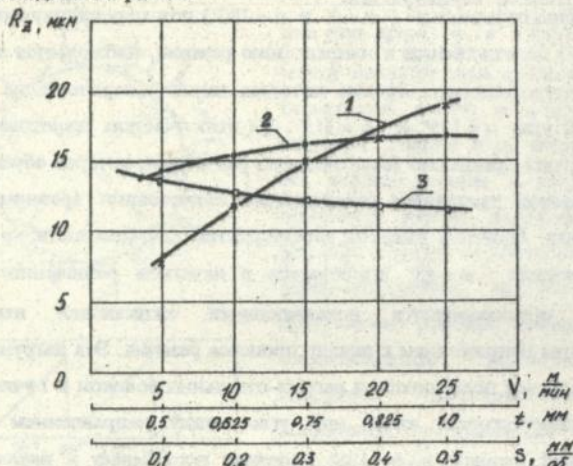


Рис.16 Зависимость шероховатости поверхности от скорости, подачи и глубины резания при точении

Приведенные зависимости получены при различных видах обработки стеклопластика и  $MgSiC$ . Однако, подобный характер зависимости параметров шероховатости от параметров режимов резания характерен почти для всех типов КМ: увеличение подачи и глубины резания приводит к увеличению шероховатости поверхности в зависимости от свойств материала, его структуры и вида обработки. Встречаются и исключения, например, при обработке (точение, сверление) боропластиков, композита  $MgSiC$  и других

подобных им КМ наблюдается некоторое снижение шероховатости поверхности при увеличении подачи. Установлено, что величину подачи целесообразно назначать больше диаметра армирующего волокна или жгутов волокон.

Экспериментальные исследования показывают разнообразие расчетных зависимостей параметров шероховатости поверхности от режимоврезания, физико-механических свойств и методов получения КМ.

Приведенные в таблице 15 зависимости по определению параметров шероховатости от технологических факторов дают лишь экспертную оценку к решению подобной проблемы и при изменении технологии получения КМ требуют экспериментальной проверки.

Таблица 15

Зависимости для расчета шероховатости механической обработки

Материал	Вид обработки	Расчетная формула
Стеклопластик	Точение	$Rz = 148 \frac{S^{0,72}}{V^{0,15} \cdot f^{0,19}}$
	Сверление	$Rz = 12,8 - 0,39 \cdot V + 1,74 \cdot D + 50,5 \cdot S$
	Алмазное сверление	$Rz = 0,851 \cdot A^{0,069} \cdot S_0^{0,18}$ Примечание: А - зернистость круга
	Шлифование	$Rz = 2,1 \cdot S^{0,08} \cdot f^{0,05}$
Органоластик	Точение	$Rz = 3550 \frac{S^{0,45}}{V^{0,72} \cdot f^{0,33}}$
Углеродистый пластик	Точение	$Rz = 74 \cdot S^{0,77} \cdot f^{-0,12}$
	Сверление	$Rz = 11,6 - 0,42 \cdot V + 1,78 \cdot D + 49,8 \cdot S$
	Алмазное сверление	$Rz = 0,851 \cdot A^{0,069} \cdot S_0^{0,18}$
Боропластик	Сверление	$Rz = 9,8 \frac{D^{0,29} \cdot V^{0,16}}{S^{0,18}}$
	Алмазное сверление	$Rz = 5,37 \cdot A^{0,40} \cdot S_0^{0,21}$
Композит	Точение	$Rz = 3,55 \frac{S^{0,07}}{V^{0,49} \cdot f^{0,13}}$

Проведенные эксперименты подтвердили обоснованность высказанной гипотезы о целесообразной геометрии инструмента при обработке КМ. С учетом зарубежного и накопленного отечественного опыта по обработке

Таблица 16

## Типы ручного механизированного инструмента и параметры обработки МКМ

Наименование инструмента	Модель	Максимальная толщина разрезаемого материала, мм	Мощность двигателя, Вт	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Число двойных ходов штока в мин.	Масса, кг	Выполняемые операции
Ножницы дисковые пневматические	НДП-3А	2,0	200	3500	-	0,8	Черновая резка по прямолинейному и криволинейному контуру
	НДП-4А	6,0	400	7,3	-	4,85	
	НДП-1,5	2,0	400	7,3	-	1,4	
Ножницы рычажные пневматические	НРП-23	1,0	120	-	2500	1,5	
Ножницы рычажные электрические	НРЭ-1	1,2	120	-	800-1500	1,6	
	НРЭК-1	2,0	400	-	4000	2,0	
Машина отрезная пневматическая	МОП-1А	5,0	220	17000	-	1,13	Чистовая резка по прямолинейному и криволинейному контуру
	МОП-3	10,0	400	14000	-	1,5	
	АМП-1	10,0	1000	4500	-	5,0	
	АМП-2	5,0	550	6000	-	2,8	
Ножовка пневматическая	НП-22	50,0	400	-	2100	2,0	
	НВП-2	1,2	400	-	2000	2,5	
Машина зачистная пневматическая	МЗП-2А	-	400	18000	-	1,2	Обточка, разделка, подрезка изачистка кромок, доводка элементов конструкций
	МЗП-1	-	200	20000	-	0,85	
Алмазно-шлифовальная машина	АМП-10	-	550	14000	-	1,5	

ПКМ, а также необходимости выполнения технологических операций изготовления деталей из листов и других полуфабрикатов КМ, под руководством автора была разработана гамма ручного механизированного инструмента, обеспечивающего черновой и чистовой раскрой листов, вырезку деталей по наружному контуру, зачистку, разделку и подрезку кромок, доводочную обработку элементов конструкций и пр. Типы разработанного ручного механизированного инструмента приведены в таблице 16.

Применение механизированного инструмента позволяет: повысить уровень механизации ручных работ до 80%; снизить трудоемкость операций в 1,8 раза; повысить производительность труда в 2,5 раза.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. В результате комплексных экспериментально-теоретических исследований в диссертации разработаны технологические процессы обработки различных типов композиционных материалов, которые широко используются в аэрокосмической технике, что имеет важное научно-техническое значение, поскольку повышение эффективности механической обработки КМ позволяет существенно расширить область применения КМ в различных отраслях промышленности.

2. Впервые предложена концепция научнообоснованного подхода к разработке классификаций и на ее основе создан классификатор обрабатываемости КМ, учитывающий влияние физико-механических свойств КМ на процесс стружкообразования, износ и стойкость инструмента, производительность и качество обработанной поверхности. Использование разработанного классификатора позволяет существенно сократить объем исследований при определении обрабатываемости новых типов конструкционных материалов.

3. Разработаны и внедрены типовые прогрессивные технологические процессы для обработки деталей, изготавливаемых из разнообразных классов КМ, что позволило сократить цикл обработки и повысить качество обработанных изделий, в частности; разработаны технологические процессы обработки заготовок с сотовым наполнителем; створок из КМ грузового люка изделия "Буран", технологический процесс механической обработки кессона стабилизатора из углепластика изделия АН-70, оригинальный техноло-

гический процесс ремонта и восстановления керамической теплозащиты изделия "Буран" и др.

4. На основе исследований, проведенных методами однофакторного и многофакторного планируемого эксперимента, получены математические модели процессов разрезки, сверления, точения и фрезерования КМ, характеризующие взаимосвязи геометрических параметров режущей части и конструктивных параметров инструмента, а также режимов резания с износом и стойкостью инструментов, качеством обработанной поверхности.

5. Разработаны руководящие технические материалы по механической обработке различных конструкционных КМ, даны рекомендации по выбору марки инструментального материала, целесообразных геометрических параметров режущей части, режимов резания; предложены и апробированы в производстве конструкции специальных режущих инструментов (инструменты с вращающимися режущими частями, сверла с подрезающими режущими кромками, концевые фрезы с новыми схемами срезания припуска и др.), определена область их рационального применения, что позволило повысить производительность обработки в 2-3 раза.

6. Выявлены общие закономерности ротационного резания, исследована кинематика ротационных инструментов, процесс стружкообразования, износ и стойкость инструмента, качество обработанной поверхности, даны рекомендации по выбору режимов обработки. Доказано, что применение ротационного резания при обработке труднообрабатываемых авиационных материалов повышает стойкость инструмента за счет, главным образом, сокращения длины пути резания режущей кромки.

7. В результате сравнительных испытаний роботоспособности режущих инструментов с различными способами поверхностной обработки лезвий (нанесение износостойких покрытий, криогенная обработка, газофазное напыление, обработка с помощью лазерного луча, энергии взрыва) установлено, что наилучшие результаты имеют инструменты с нанесенным покрытием методом КИБ.

Разработаны руководящие технологические материалы по нанесению износостойких покрытий на сверла, фрезы, метчики на установках типа "Булат". Доказано, что инструменты с покрытием имеют стойкость в 1,52 раза большую, чем без покрытия.

8. Созданы и внедрены средства механизации ручных операций для реализации экологически чистых операций механической обработки КМ, что позволило повысить уровень механизации ручных работ до 80%, снизить трудоемкость в 1,8 раза и повысить производительность труда в 2,5 раза.

9. Результаты работы реализованы в авиастроении, судостроении, приборостроении, сельхозмашиностроении и других отраслях промышленности Украины и стран СНГ, экспонировались на отечественных и международных выставках (во Франции, Германии, Италии, Китае, Объединенных Арабских Эмиратах).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Обработка высокопрочных материалов инструментами с самовращающимися режущими В.А. Землянский, Б.В. Лупкин/ Киев: Техніка, 1980.- 118с.

2. Обработка материалов и сплавов ротационными инструментами на станках с ЧПУ/ Б.В. Лупкин, В.А. Остафьев Киев: "Знание", 1982.- 27с.

3. Лупкин Б.В. Механическая обработка КМ ручным механизированным инструментом. В кн.: "Руководство по технологической подготовке производства летательных аппаратов" (под общ. ред. чл.корр. АНРФ Белянина П.Н.) М.: НИАТ, 1990.- 465с.

4. Конструкции из металлических композиционных материалов Г.А. Кривов, В.А. Титов, Б.В. Лупкин и др.- Киев: Техніка. 1992.-224с.

5. Современные технологии обработки и сборки изделий машиностроения/ (под общ.ред.Кривова Г.А.) Г.А. Кривов, В.А. Титов, Б.В. Лупкин и др.- Киев: Техніка. 1993.- 143с.

6. Кривов Г.А., Лупкин Б.В. Механическая обработка полимерных композиционных материалов. В кн. том I: "Composite manufacturing technology" (под общ.ред. Братухина А.Г., Боголюбова В.С.) London. 1995. С.155-218

7. Точение износостойких покрытий/ С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Б.В. Лупкин и др.- К.: Техніка. 1996.- 206с.

8. Лупкин Б.В., Кривов Г.А., Степанов А.А. Процессы, оборудование и инструмент для механической обработки полуфабрикатов и изделий из

ПКМ. Энциклопедическое издание "Композиционные материалы"/под общ. ред. акад. Р.Ф. Фролова, т.6- М.: Машиностроение. 1997.- 113с.

9. Лупкин Б.В., Кантер Г.Г., Михеев А.С. Резка полимерных композиционных материалов дисковыми ножами. //Авиационная промышленность. 1985. N12.

10. Лупкин Б.В., Кривов Г.А., Матвиенко В.А. Некоторые направления совершенствования технологии производства авиационных конструкций из КМ. В сб. "Технология " вып.1.- М.: НИАТ. 1988.- С.36-45.

11. Лупкин Б.В., Михеев А.С., Изунов В.Н. Механическая обработка композиционных материалов // В сб. "Авиационная технология". -М.: НИАТ. 1988. Вып. 5(8). С. 114-116.

12. Лупкин Б.В. Конструкции из композиционных материалов. Сб. Технология. М.: ВИМИ. 1990. Вып.3. 107с.

13. Степанов А.А., Кривов Г.А., Лупкин Б.В. Исследования обрабатываемости металло-композиционного материала MgSiC. В сб. "Технология производства деталей из композиционных материалов".-К. УкрНИАТ. 1991. С.6-7.

14. Лупкин Б.В., Михеев А.С. Методы обработки полимерных композиционных материалов. В сб. "Перспективы развития технологии изготовления конструкций из КМ". М.: НИАТ. 1986.- С.24-33.

15. Лупкин Б.В., Михеев А.С., Голицын М.И. Применение алмазных отрезных кругов порезки полимерных КМ. В сб. "Перспективы развития технологии изготовления конструкций из КМ" М.: НИАТ. 1986.- С.33-37.

16. Лупкин Б.В., Землянский В.А. TP-708-78 "Ротационные методы обработки резанием". М.: НИАТ. 1978.- 24с.

17. Кривов Г.А., Титов В.А., Лупкин Б.В. ТИ-36-34-89 "Изготовление подкосов диаметром 60 и 75 мм с одношовной сварной трубой из листового металлического композиционного материала марки ВКА-2". Киев.: 1989.- 41с.

18. Лупкин Б.В., Еленевич В.Б. TP-171-04-90 "Типовые операции механической обработки деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов". Киев.: 1990.- 28с.

19. Лупкин Б.В., Уразев Т.Ю. РТМ-1520-75 "Торцовое ротационное фрезерование высокопрочных сталей ВНС-2, ВНС-5". М.: НИАТ. 1976.-44с.

20. Лупкин Б.В., Еленевич В.В. ТР.У.3.001.003.94 "Изготовление алмазного и абразивного инструмента для обработки алюминисвых и композиционных материалов". Киев.: НИАТ. 1994.- 32с.

21. Лупкин Б.В., Уразаев Т.Ю. ОСТ.52288-52289-78 "Фрезы торцовые ротационные диаметром от 70 до 100 мм для обработки труднообрабатываемых материалов". М.: НИАТ. 1984.- 28с.

22. Лупкин Б.В., Смилян В.И. РТМ1.4.40182 Изготовление деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов, М.: НИАТ. 1984.- 28с.

23. Лупкин Б.В., Смилян В.И., Уразаев Т.Ю. ТР-1.4.135684 "Раскрой тканей, пресрегов и отрезка технологического припуска с применением переносных пневматических инструментов". М.: НИАТ. 1985.- 18с.

24. Лупкин Б.В., Смилян В.И. ТР-1.4.1773-87 Механическая обработка деталей и агрегатов из ПКМ. Типовые операции технологического процесса. М.: НИАТ. 1988.- 45с.

25. Лупкин Б.В., Еленевич В.В. ТР-1.4.104882 "Алмазно-абразивная обработка типовых элементов деталей из ПКМ". М.: НИАТ.1984.- 32с.

26. Лупкин Б.В., Еленевич В.В. РТМ-1.4.1968-88 "Инструмент абразивный, алмазный и лезвийный для обработки композиционных материалов на полимерных (угле-, стекло-, органопластиков) и металлической (бор-алюминий) матрицах". М.: НИАТ. 1988.

27. Лупкин Б.В., Еленевич В.В. ТР-1.4.2004-90 "Механообработка полимерных композиционных материалов". М.: НИАТ. 1990.- 35с.

28. Лупкин Б.В., Уразаев Т.Ю. ТР-1.4.1187-93 "Нанесение износостойких покрытий на инструмент методом конденсации материала на установках типа "Булат". М.: НИАТ. 1983.-17с.

29. Кривов Г.А., Титов В.А., Лупкин Б.В. ТР-1.4.1818-87 "Изготовление деталей из листового металлического композиционного материала (МКМ) марки ВКА-2". М.: НИАТ. -41с.

30. Лупкин Б.В., Ермолаев Э.К. ТР-1.4.1987 "Применение ручных средств механизации и инструмента для удаления дефектных элементов ТЭК при ремонте БТС". М.: НИАТ. 14с.

31. Лупкин Б.В., Еленевич В.В. Алмазно-абразивная резка ПКМ. В об.: "Технология и организация производства". К.: N 1. 1990.- С.3-5.

32. Лупкин Б.В., Ермолаев Э.К. Исследование и разработка технологических рекомендаций по удалению дефектных элементов ПТЗМ и ГТЗН. М.: НИАТ.- 54с.

33. Лупкин Б.В., Кантер Г.Г., Михеев А.С. Резка ПКМ сверхзвуковой струей жидкости. //Авиационная промышленность. 1985. N 10

34. Лупкин Б.В., Кривов Г.А. Обрабатываемость резанием металлических композиционных материалов ВКА-2". В сб. "Теория и практика технологии производства изделий из КМ". М.: ВИМИ. 1988. С.23-28.

35. Лупкин Б.В., Равская Н.С., Адаменко Ю.И. Исследование силовых характеристик при фрезеровании органопластиков. В сб. "Технология производства деталей из КМ". -М.: ВИМИ, 1991. С.8-9.

36. Лупкин Б.В., Равская Н.С., Родин Р.П. Сверла с обратным углом при вершине и их использование при сверлении КМ. В сб. "Технология про-изводства деталей из КМ". -М.: ВИМИ, 1991. С.13.

37. Лупкин Б.В., Глоба А.В. Механическая обработка композиционных материалов. // В сб. "Комплексно-механизированные технологии и оборудование для ремонта авиационной техники".- М.: ВИМИ, 1991. С.14-24.

38. Лупкин Б.В., Воробьев Г.П., Глоба А.В. Типовые технологические процессы обработки КМ. В сб. " Технология производства деталей из компо-зиционных материалов" Киев: "Знание". 1992. С.19-20.

39. Лупкин Б.В., Воробьев Г.П., Глоба А.В. Технология обработки крупногабаритных деталей из КМ. В сб. " Технология производства деталей из композиционных материалов" Киев: "Знание". 1992. С.21-22.

40. Лупкин Б.В., Швецов В.Е. Средства механизации для обработки ПКМ. в сб.: "Технология и организация производства".- К.: Н1, УкрНИИНТИ, 1990, С.23-24.

41. А.с. 451280 СССР МКИ'В23 С5/10, В23 С5/22 Сборная фреза/ Б.В.Лупкин, А.А.Смоляр, В.А.Землянский и др.

42. А.с. 804237 СССР МКИ'В23 С5/06, В23 В27/12 Режущий инструмент/ Б.В.Лупкин, Т.Ю.Уразаев, В.В.Захарченко и др.

43. А.с. 1121851 СССР МКИ'В23 С5/16 Инструмент для обработки соловых заполнителей/ Б.В.Лупкин, Т.Ю.Уразаев, М.И.Баргман и др.

44. А.с. 1173626 СССР МКИ'В23 С5/06 Торцовая фреза/ Б.В.Лупкин, Т.Ю.Уразаев, А.Н.Строшков и др.

45. А.с. 1262823 СССР МКИ'В23 С5/16 Фреза для обработки сотовых заполнителей/ Т.Ю.Уразаев, В.В.Лупкин, М.И.Баргман и др.
46. А.с. 1324202 СССР МКИ'В28 D1/06 Пыльное полотно для резки композиционных материалов/ В.В.Лупкин и Т.Ю.Уразаев.
47. А.с. 1401789 СССР МКИ'В29 С37/00 Фреза/ В.В.Лупкин, Т.Ю.Уразаев, Э.К.Ермолаев и др.
48. А.с. 1429451 СССР МКИ'В23 В31/04 Инструментальная насадка/ В.В.Лупкин, В.С.Щепелинский, Э.К.Ермолаев и др.
49. А.с. 1543705 СССР МКИ'В23 D19/00 Устройство для резки изделий/ В.В.Лупкин, В.С.Щепелинский и др.
50. А.с. 1624849 СССР МКИ'В26 D1/24 Дисковые ножницы/ В.В.Лупкин, Т.Ю.Уразаев, Ю.А.Васильев.
51. А.с. 1790073 СССР МКИ'В05 D1/02 Способ нанесения многокомпонентных композиций/ В.В.Лупкин, Т.Ю.Уразаев, Е.Я.Баран и др.
52. А.с. 1815847 СССР МКИ В05 В9/03 Устройство для нанесения многокомпонентных материалов/ В.В.Лупкин, Т.Ю.Уразаев, Н.Е.Ефимцев.
53. А.с. 1817378 СССР МКИ В23 С5/12 Инструмент типа фрезы/ В.В.Лупкин, Т.Ю.Уразаев, И.В.Ведмиденко.
54. А.с. 1833769 СССР МКИ'В29 С37/00 Фреза для обработки пластмасс/ В.В.Лупкин, П.Р.Родин, Н.С.Равская, Ю.И.Адаменко.

## АННОТАЦИЯ

**“Научные основы механической обработки композиционных материалов, применяемых в авиационии”**

*Диссертация в форме научного доклада на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.04 -*

*Технология производства летательных аппаратов*

**ЛУПКИН БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ**

Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии,  
Киев, 1997 г., с.

Содержит обобщение 190 опубликованных научных работ по результатам теоретических и экспериментальных исследований, представляющих собой научные основы обрабатываемости композиционных материалов.

Разработан классификатор обрабатываемости полимерных и металлополимерных композиционных материалов (КМ), проведено математическое моделирование процессов резки, сверления, точения и фрезерования различных типов КМ; даны рекомендации по выбору геометрических параметров инструмента и режимов резания. Созданы средства механизации ручных работ для механической обработки КМ. Осуществлено промышленное внедрение разработанных технологических операций.

**Ключевые слова:** Технология обработки, полимерные и металлополимерные КМ, резка, сверление, точение, фрезерование, шлифование, лезвийный и абразивно-алмазный инструмент, ручной инструмент.

# ANNOTATION

Scientific principles of composition materials  
machining applied in aircraft industry

Thesis in the form of scientific report  
for a doctor's degree of technical sciences  
in the speciality 05.07.04 -  
*Aircraft Production Technology*

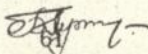
**BORIS V. LUPKIN**

Ukrainian Research Institute of Aircraft Technology,  
Kiev, 1997

It contains the generalisation of 190 published scientific works on the results of theoretical and experimental investigations that are the scientific foundation of composition materials machinability.

There was worked out a polymeric and metal-polymeric composition materials machinability classifier; passed a mathematical modelling of the process of cutting, drilling, turning, milling, grinding of various types of composition materials; given some recommendation as to the choice of the cutting part geometric parameters, the tool constructive parameters and the conditions of cutting. There were created means of handwork mechanisation for composition materials machining; put into practice the industrial introduction of the worked out operations.

Key words: technology of machining; polymeric and metal-polymeric composition materials; cutting; drilling; turning; milling; grinding.



Підписано до друку 24.12.96 г. Формат 60х84/16.  
Папір Друкарський №2. Гарнітура Times ET.  
Ум. друк. арк. 4,1. Тираж 100 прим.  
Заказ 23.

Друк КВІЦ 254080 Київ, вул. Фрунзе, 47







AB 36.994