

УДК 66.017

Я.А. Приписнов¹, О.И. Гришина¹**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61

Приведен обзор основных методов механической обработки, применяемых в настоящее время для композиционных материалов, рассмотрена их обрабатываемость, указаны достоинства и недостатки различных методов обработки. Проведен анализ лезвийной механической обработки, включающий особенности износа и различные варианты покрытия режущего инструмента. Описаны также два метода ультразвуковой обработки, отображены возможности лазерной обработки и пояснена сущность гидроабразивной резки материалов. В заключении сделан вывод о перспективах механической обработки композиционных материалов.

Ключевые слова: лезвийная механическая обработка, ультразвуковая обработка, лазерная обработка, гидроабразивная резка, армирующие волокна, металлический композиционный материал.

Ya.A. Pripisnov¹, O.I. Grishina¹**MODERN METHODS OF MECHANICAL PROCESSING
OF COMPOSITE MATERIALS (review)**

A review of the main machining methods currently used for composite materials is given, their machinability is considered, the advantages and disadvantages of various processing methods are indicated. The analysis of blade machining, including features of wear and various options for coating the cutting tool. Two methods of ultrasonic processing are also described, the possibilities of laser processing are displayed, and the essence of water-jet cutting of materials is explained. In conclusion, the conclusion is made about the prospects of mechanical processing of composite materials.

Keywords: blade machining, ultrasonic processing, laser processing, waterjet cutting, reinforcing fibers, metallic composite material.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Вследствие стремительного развития материаловедения использование композиционных материалов (КМ) стало повсеместным. Появление новых КМ с уникальным сочетанием свойств, которые превосходят свойства классических материалов, требует в машиностроении разработки и внедрения новых технологических методов их обработки, характеризующихся повышенной точностью и производительностью [1–3].

Развитие механической обработки направлено на получение высокоточных изделий с минимальными затратами и автоматизацию оборудования.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12. «Металломатричные и полиматричные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4].

Материалы и методы

Благодаря своим высоким механическим показателям в сочетании с низкой плотностью, КМ находят все более широкое применение в авиастроении, космической технике, морских сооружениях, трубопроводах, электронике, автомобилестроении и многих других областях [5–7].

Как правило, одна из фаз в КМ – непрерывная (матрица), которая может быть полимером, металлом или керамикой. Другая фаза является дисперсной (частицы) или непрерывной (волокна) и может состоять из стекла, графита, бора, арамидов и других различных оксидов, карбидов и нитридов [8]. Матричная фаза обычно более пластичная и менее твердая, тогда как дисперсная фаза обычно тверже матрицы.

Основной вид механической обработки КМ – лезвийная обработка, в которой воздействие на материал происходит вращающимся режущим инструментом (точение, фрезерование, сверление, шлифование). Применяются также гидроабразивные, ультразвуковые и лазерные методы обработки.

Зарубежный опыт и отечественная практика показали, что обрабатываемость КМ по ряду критериев идентична, несмотря на различия по их составу и свойствам. Рационально разделять обрабатываемость КМ по атрибутам, что будет способствовать в дальнейшем определению оптимальных режимов обработки [9].

При лезвийной обработке многих КМ не допускается использование смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) из-за риска набухания и расслоения материала, ввиду активизации процесса водопоглощения. В случае необходимости охлаждения заготовки без использования СОЖ, назначают охлаждение сжатым воздухом.

Особенности механической обработки КМ [10] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обрабатываемость композиционных материалов (КМ) резанием

Атрибут структуры КМ	Влияние на свойства КМ	Влияние на обрабатываемость КМ
Свойства матрицы	Твердость, прочность, жесткость, теплопроводность, вязкость	Обеспечение лучшей обрабатываемости при наличии оптимальной прочности матрицы
Особенности укладки и ориентации волокон в матрице	Анизотропия свойств	Различие процесса резания вдоль и поперек армирующих волокон, возрастающая вероятность расслоения во время обработки при высокой анизотропии
Тип армирующего волокна	Прочность, жесткость	С повышением прочности материала абразивное действие волокон и силы резания увеличивается
Диаметр армирующего волокна	Увеличение диаметра волокна снижает прочность материала	Обрабатываемость ухудшается
Длина волокна	–	При использовании коротких волокон материал более склонен к расслоению и вытягиванию волокон, что ухудшает обрабатываемость

Механическая обработка металлических композиционных материалов (МКМ) и полимерных композиционных материалов (ПКМ) отличается применением как традиционных лезвийных и абразивных методов механической обработки (точение, фрезерование, шлифование и др.), так и новых методов (лазерное сверление, гидроабразивная резка и др.), а также комбинированных методов обработки. Для керамических композиционных материалов (ККМ) и углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) применяют преимущественно ультразвуковую обработку [11].

Преимущества и недостатки методов механической обработки КМ [10] приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные характеристики методов механической обработки композиционных материалов (КМ)

Вид обработки	Достоинства	Недостатки
Механическая (лезвийная)	Высокая точность обработки, низкая шероховатость обработанных поверхностей	Низкая стойкость режущего инструмента приводит к расслоению материала, вырыванию волокон, повышению температуры в зоне резания, вследствие этого возникает термическая деструкция матрицы КМ
Гидроабразивная	Высокая производительность, возможность резки материала большой толщины, отсутствие термической деструкции матрицы КМ	Высокая шероховатость обработанных поверхностей, высокая вероятность насыщения материала водой
Лазерная	Высокая точность обработки, отсутствие габаритных ограничений для деталей или заготовок	Термическая деструкция матрицы КМ с незначительным оплавлением краев в зоне резания, выделение дыма и пыли
Ультразвуковая	Высокая точность обработки, низкая шероховатость обработанных поверхностей, отсутствие или минимальное расслоение материала	Низкие производительность и стойкость режущего инструмента

Лезвийная обработка МКМ

Для обеспечения заданной конфигурации изделий из МКМ лезвийная обработка включает операции точения, сверления, фрезерования и пр., в частности обработку на токарных и фрезерных станках, или в многофункциональных обрабатывающих центрах.

Токарную обработку МКМ используют для обработки тел вращения. При обработке длинномерных заготовок на универсальных токарно-винторезных станках (1К62, 16К20 и др.) используют люнеты, чтобы уменьшить прогибы обрабатываемого материала.

При обработке МКМ главной проблемой является обеспечение качества поверхностного слоя изделий, так как он играет ключевую роль в показателях эксплуатационных характеристик материала. При лезвийной обработке изменяется состояние слоя, происходит перерезание армирующих волокон, что приводит к снижению прочности до 20% [9]. Это связано с анизотропией свойств КМ, наличием у них слоистой структуры, высоких прочностных характеристик, низкой теплопроводности и высокой твердости наполнителя. Поэтому первоначально решают проблему выбора режущего инструмента.

Опытным путем выявлено [12], что при резании МКМ основной износ режущего инструмента, вызванный упругим восстановлением обрабатываемого материала после прохождения режущего клина, приходится на его заднюю поверхность (рис. 1). Износ по передней поверхности режущего инструмента не столь значителен и вызван высокой температурой в зоне резания, трением отделяющейся стружки и абразивным износом разрушаемого материала заготовки.

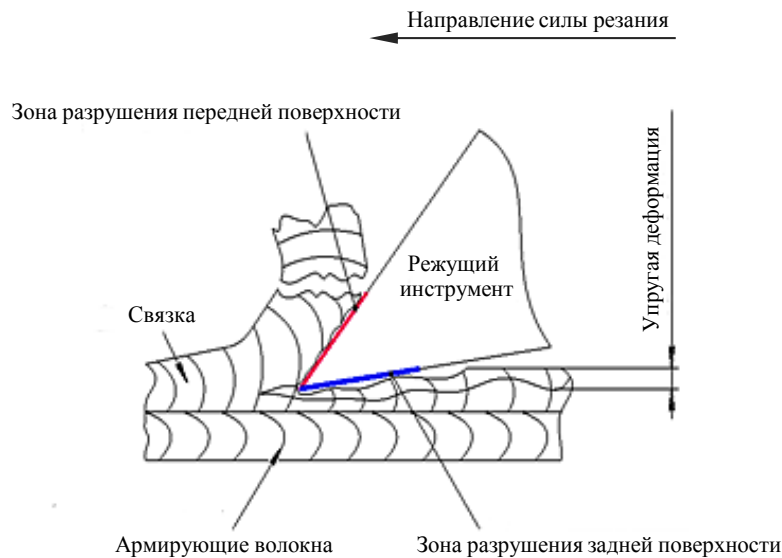


Рис. 1. Схема износа поверхностей режущего инструмента при лезвийной обработке металлического композиционного материала

В обработке МКМ исследователи [13, 14] отметили превосходство режущего инструмента с покрытием из поликристаллического алмаза (PCD) и с профильной впайкой вставок из PCD над инструментом с покрытием из оксида алюминия или карбида титана (Al_2O_3/TiC) вследствие его более высокой твердости и теплопроводности, которая помогает эффективно выводить тепло из зоны резания. Инструмент с покрытием из поликристаллического кубического нитрида бора (PCBN) и PCD признан в обработке МКМ лучшим [15], чем твердосплавный инструмент без покрытия, содержащий в основном карбиды вольфрама (WC). В работе [16] отмечено, что вставки с CVD (химическое осаждение из паровой фазы) и PCD-покрытием при обработке МКМ значительно снижают износ инструмента. Вставки из PCBN, которые обладают исключительной твердостью в горячем состоянии и характеризуются хорошей прочностью и термостойкостью, используются при очень высоких скоростях резания и являются наилучшими по производительности в лезвийной обработке Al–SiC материалов.

Ультразвуковые способы формообразования

Во время ультразвуковой обработки материал удаляется режущим инструментом, которому передаются колебания. Такая обработка позволяет получать изделия сложной формы из твердых и хрупких труднообрабатываемых материалов, в том числе и КМ. Различают два метода ультразвуковой обработки.

Размерная ультразвуковая обработка – это процесс формообразования, при котором съем материала производится за счет режущего инструмента, колеблющегося с высокой частотой и низкой амплитудой в среде суспензии абразивного порошка (рис. 2) [17]. Инструмент перемещается вертикально или ортогонально к поверхности детали при амплитудах от 0,05 до 0,125 мм. Мелкие абразивные зерна смешивают с водой для образования суспензии, которая распределяется по части режущей поверхности и кончику инструмента. Типичные размеры зерен основной фракции абразивного материала варьируются от 1000 до 100 мкм (зернистость – от №10 до 80 по ГОСТ 52381–2005), где меньшие зерна (большее количество зерен) обеспечивают более гладкую поверхность. В результате процесса копируется форма режущего инструмента в изделии.

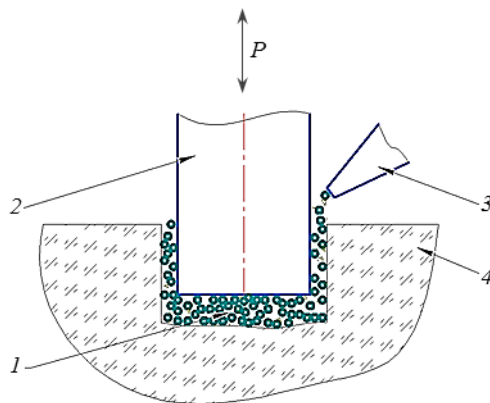


Рис. 2. Принцип размерной ультразвуковой обработки: 1 – суспензия абразивного порошка; 2 – режущий инструмент; 3 – подача суспензии; 4 – обрабатываемый материал (изделие)

При втором методе колебания накладываются непосредственно на вращающийся режущий инструмент. Значительных успехов в этом направлении добилась фирма-производитель обрабатывающего оборудования DMG MORI (Германия), представившая в 2013 г. линейку обрабатывающих центров ULTRASONIC, которые позволяют изготавливать детали сложной формы из труднообрабатываемых КМ, керамики, стекла и корунда [18]. Принцип работы обрабатывающих центров с технологией ULTRASONIC изображен на рис. 3. Путем наложения ультразвуковых колебаний на осевое вращение режущего инструмента достигается сокращение силы резания до 40% в отличие от общераспространенных методов лезвийной механической обработки. Технология резания ULTRASONIC также позволяет повысить скорость и величину подачи, продлить срок службы режущего инструмента и обеспечить шероховатость R_a до 0,1 мкм.

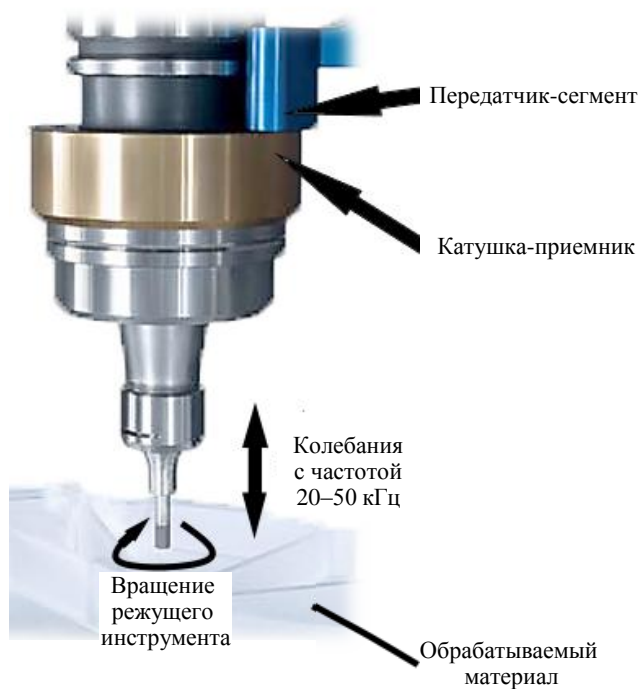


Рис. 3. Принцип технологии ультразвуковой обработки ULTRASONIC

При передаче ультразвуковых колебаний режущему инструменту происходит воздействие на взаимодействие вращающегося режущего инструмента и обрабатываемого материала [19]:

- циклически меняются модуль и направление вектора действительной скорости резания;
- циклически меняются кинематические углы инструмента, в результате изменяются условия формирования поверхностного слоя детали, что приводит к улучшению его (слоя) качества (снижаются растягивающие остаточные напряжения);
- меняются условия трения на рабочих гранях и устраняется наклеп материала на инструмент;
- повышается динамическая устойчивость технологической системы «станок–приспособление–инструмент–деталь»;
- улучшаются условия доступности и проникновения смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания;
- сокращаются силы и мощность, затрачиваемые на механическую обработку.

Точность и качество обработанной поверхности являются приоритетными факторами для конечной продукции, особенно это касается процесса получения отверстий. Наличие заусенцев негативно сказывается на процессе сборки изделия, поэтому существует практически единственный способ уменьшить или предотвратить образование заусенцев при обработке материалов – это применение ультразвуковых вибраций при операции сверления.

Дополнение металлорежущего оборудования ультразвуковыми устройствами, применение специализированного алмазного режущего инструмента и внедрение соответствующих технологических процессов открывают новые возможности в формообразовании КМ.

Обработка с применением лазерных технологий

Лазерная обработка позволяет реализовать широкий спектр технологических процессов и видов механической обработки. Наиболее распространены операции по раскрою листового материала по сложному контуру, гравировке, наплавке, сварке (LBW), закалке, сверлению (одноимпульсное, ударное трепанирование (вырезание отверстий), сверление лазерным спиральным сверлом) и др. [20].

Раскрой листового материала является заготовительной операцией, подразумевающей размещение заготовок на листе. Лазерный раскрой считается прогрессивным методом раскроя и применяется при серийном производстве изделий практически из всех материалов, в том числе МКМ и ПКМ. Луч лазера, управляемый специализированным программным комплексом станка, обеспечивает концентрацию энергии, достаточную для прорезания листового материала любой толщины и состава.

Лазерная гравировка отличается тем, что изображение или текст наносится на какое-либо изделие с помощью сфокусированного лазерного луча и имеет некоторую глубину (рельеф).

В процессе *лазерной наплавки* материал наносится при помощи лазерного луча, используемого для создания ванны расплава, куда подается материал. В качестве присадки используют порошок или проволоку. Наплавку производят или непрерывным лазером, характеризующимся большей производительностью, или импульсным лазером, отличающимся большой пиковой мощностью.

Сварка материалов пучком лазера – LBW (Laser Beam Welding) – получила большое распространение в области автомобилестроения как автоматизированный процесс при работе с объемными конструкциями. Лазерный пучок в качестве

концентрированного источника тепла образует узкие и глубокие сварные швы при высокой скорости сварки [21]. С помощью разностороннего LBW-процесса удастся сваривать углеродистые, никелевые и коррозионностойкие стали, алюминий и титан. Однако из-за высокой скорости охлаждения при сварке высокоуглеродистых сталей возникает проблема появления трещин. Сварной шов имеет высокое качество, аналогичное получаемому при электронно-лучевой сварке (EBW). Скорость сварки пропорциональна мощности излучения лазера, но также зависит от типа и толщины обрабатываемого материала.

Некоторые из преимуществ LBW по сравнению с EBW заключаются в следующем:

- лазерный луч передается через воздух, при этом не требуется условий вакуума;
- процесс легко автоматизируется с помощью робототехнического оборудования;
- при LBW отсутствует рентгеновское излучение;
- LBW – сварка более высокого качества.

Производная от LBW-процесса – *гибридная лазерная сварка* совмещает преимущества лазерной сварки с методом дуговой сварки. Это сочетание позволяет добиться большей точности перемещения лазера, так как сварка в защитном газе позволяет расплавить металл до заполнения стыка шва, а за счет использования лазера увеличивается скорость сварки сверх той скорости, которая обычно возможна при дуговой сварке в защитных газах (GMAW). Качество сварки при гибридной лазерной сварке, как правило, выше, чем при LBW-процессе.

Сверление отверстий с помощью лазерных технологий является методом с самым большим количеством операций. Такое сверление широко применяют для получения отверстий не только в материалах с высокой твердостью, но и при обработке особо хрупких материалов. Если сверление отверстий цельными сверлами диаметром <250 мкм является труднореализуемой практической задачей, то лазерное сверление позволяет получать отверстия диаметром, соизмеримым с длиной волны излучения, с достаточно высокой точностью позиционирования.

С помощью лазера также осуществляют метод *прямого лазерного спекания* (DMLS), который относится к сфере аддитивных технологий и позволяет в короткий срок получить детали и образцы любой формы из порошков высококачественной и инструментальной сталей, алюминия и титана [22]. Метод DMLS имеет колоссальный потенциал для применения в промышленности благодаря реализуемости широкого круга задач при производстве.

При применении лазерных методов не происходит прямого механического воздействия на обрабатываемый материал, благодаря чему деформации сведены к минимуму, а точность максимальна. В процессе резания мощный световой поток фокусируется на определенном участке, вызывая плавление или испарение обрабатываемого материала.

Поскольку КМ характеризуются сочетанием нескольких материалов, выбор правильной длины волны лазера является ключевым параметром [23]. Если матрица и армирующий компонент КМ органические, то они поглотят всю энергию лазерного луча (CO₂). Если установить достаточно высокую мощность лазера, можно рассчитывать, что луч пройдет через весь обрабатываемый материал, оставляя ровные и чистые края.

Лазерная обработка является перспективным методом обработки как традиционных материалов, так и КМ. При этом решается широкий спектр задач, возникающих при механической обработке.

Гидроабразивная резка

Под гидроабразивной резкой подразумевают такой вид механической обработки, при котором удаление обрабатываемого материала происходит посредством воздействия на него струи воды, смешанной с твердым абразивным материалом, под высоким давлением и с высокой скоростью [24]. Такая механическая обработка позволяет получать высокое качество реза (шероховатость кромки $R_a=1,6$ мкм) в зависимости от обрабатываемого материала. В качестве абразива принято применять гранатовый песок, однако также используют карбид кремния или электрокорунд, повышающие скорость резания в 2–4 раза, но увеличивающие стоимость операции резки.

Гидроабразивная резка показывает высокую эффективность при обработке таких труднообрабатываемых материалов, как высокопрочные стали, керамика, титановые сплавы, а также при резке многослойных, сотовых и других КМ.

Заключения

Сведения, приведенные в научно-технической литературе, позволяют сделать вывод, что систематизированные данные о процессах формообразования изделий из КМ отсутствуют. Выполнение требований к геометрической форме и качеству поверхности изделий возможно, в частности, с помощью режимов резания, основанных на режимах обработки традиционных материалов. Все существующие эмпирические зависимости не учитывают анизотропные свойства существующих КМ.

В результате обзора проведенных исследований выявлено, что современный технический уровень подготовки режущего инструмента для обработки КМ не до конца изучен, что задает направления для исследования новых материалов, повышающих стойкость режущего инструмента, а также разработки и внедрения конструкторско-технологических решений для рационализации процессов формообразования изделий из КМ.

Наиболее перспективными направлениями в области формообразования изделий из КМ являются методы лазерной обработки, совмещенные с аддитивными технологиями.

Автоматизация процессов обработки и комбинирование методов резания оказывают существенное влияние на процесс изготовления изделий в промышленности, позволяя получить качественный продукт в короткий срок и при низких затратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
2. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // *75 лет. Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012–2016 гг. // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
7. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.

8. Chandramohan D., Murali B. Machining of composites – a review // *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. URL: http://www.auif.utcluj.ro/images/VOLUME12_3/10_Chandramohan_Murali_67_71 (дата обращения: 10.09.2018).
9. Карташов А.Б. Механическая обработка композитов [Электронный ресурс]. URL: www.bmstu.ru/ps/~kartashov/fileman/download/ПКМ2017/ПКМ_ВКМ_11.pdf (дата обращения: 10.09.2018).
10. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №9. Ст. 12. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.
11. Мешкас А.Е., Макаров В.Ф., Ширинкин В.В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования // *Известия ТулГУ. Сер.: Технические науки.* 2016. Вып. 8. Ч. 2. С. 292.
12. Ющенко Д.А., Лобанов Д.В. Методы лезвийной обработки изделий из композиционных материалов их специфика и перспективы // *Технологии и материалы.* 2015. №3. С. 30–35.
13. Ravi Sekhar T.P. Singh Mechanisms in turning of metal matrix composites: a review // *Journal of Materials Research and Technology.* 2015. No. 4 (2). P. 197–207. URL: <http://www.jmrt.com.br> (дата обращения: 10.09.2018). DOI: 10.1016/j.jmrt.2014.10.013.
14. El-Gallab M., Sklad M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites: Part I: Tool performance // *Journal of Materials Processing Technology.* 1998. No. 83. P. 151–158. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698000545> (дата обращения: 21.09.2018). DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00054-5.
15. Hooper R.M., Henshall J.L., Klopfer A. The wear of polycrystalline diamond tools used in the cutting of metal matrix composites // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436898000407> (дата обращения: 24.09.2018). DOI: 10.1016/S0263-4368(98)00040-7.
16. Weinert K., Biermann D. Turning of fiber and particle reinforced aluminium // *Proceedings of the International Conference on Machining Of Advanced Materials.* 1993. P. 437–453.
17. Моргунов Ю.А., Опальницкий А.И., Перепечкин А.А. Современное состояние и перспективы применения в машиностроении ультразвуковой размерной обработки изделий // *Известия МГТУ «МАМИ».* 2012. №2 (14). Т. 2. С. 140–144.
18. Yan Chen, Yuhong Liang, Jihua Xu, Andong Hu. Ultrasonic vibration assisted grinding of CFRP composites: Effect of fiber orientation and vibration velocity on grinding forces and surface quality // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture.* September. 2018. P. 189–196. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840418300386> (дата обращения: 08.10.2018). DOI: 10.1016/j.ijlmm.2018.08.003.
19. Вашуков Ю.А. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов // *Мультимедийный образовательный модуль.* Самара: Изд-во СГАУ, 2012. С. 101. URL: <https://www.twirpx.com/file/1771851/> (дата обращения: 09.10.2018).
20. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маслаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. Минск: Белорусская наука. 2008. С. 232–242.
21. Xie J. Dual beam laser welding // *Welding Journal.* 2002. Vol. 81. No. 10. P. 223–230.
22. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // *Вестник Мурманского государственного технического университета.* 2014. Т. 17. №1. С. 7–12.
23. Shanmugam D.K., Chen F.L., Siores E., Brandt M. Comparative study of jetting machining technologies over laser machining technology for cutting composite materials // *Composite Structures.* 2012. No. 57. P. 289–296. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382230200096X> (дата обращения: 10.09.2018). DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00096-X.
24. Грищенко Т.А., Мелюхов Н.И., Любушкин В.О. Применение гидроабразивной резки при обработке деталей из полимерных композиционных материалов // *Вестник инженерной школы ДВФУ.* 2017. №2 (31). С. 49–55. URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/2-31/6/> (дата обращения: 10.09.2018). DOI: 10.5281/zenodo.808901.