

УДК 678.067.621.892

DOI: 10.12737/article\_5971daadf14630.10399069

**Ю.М. Зубарев, д.т.н.,**

**А.В. Приемышев, к.т.н.**

(ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет Петра Великого  
195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29)

E-mail: iuzubarev@mail.ru

## **Инновационные технологии обработки полимерных композиционных материалов в машиностроении**

*Рассмотрены особенности обработки резанием полимерных композиционных материалов: стружкообразование; износ режущего инструмента, изготовленного из различных инструментальных материалов; силы резания и качество обработанной поверхности.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы; углепластики; лезвийная обработка; режущий инструмент; режимы резания; качество обработки.

**Yu.M. Zubarev, D. Eng.,**

**A.V. Priemyshev, Can. Eng.**

(FSAEI HE Peter the Great State University of Saint-Petersburg 29, Polytechnicheskaya Str., Petersburg 195251)

## **Innovation technologies of polymeric composite materials in mechanical engineering**

*The peculiarities of polymeric composite material cutting are considered: chip formation, wear of a cutter manufactured of different tool materials; forces of cutting and quality of a surface worked.*

**Keywords:** polymeric composite materials; carbon plastic; cutting edge treatment; cutter; cutting modes; machining quality.

В настоящее время во всех отраслях машиностроения достаточно широко используются различные полимерные композиционные материалы (ПКМ), номенклатура которых, как по свойствам, так и по областям применения, непрерывно растёт. Сегодня разработка и использование эффективных материалов для машиностроения является одной из приоритетных.

Различные пластмассы начиная с середины XX в. стали широко применяться в машиностроении. XXI в. открывает эру нанотехнологий. Создаются и уже широко используются полимерные композиционные материалы, различные углепластики, армированные волокнами, нитями, пряжами и пр. Представителем таких углепластиков, например, является карбон. Он в шесть раз прочнее титана, при этом в пять раз легче высокопрочной стали и в 1,5...2 раза легче алюминия. Он применяется сегодня не

только для обшивки корпусов самолётов-невидимок и космических антенн, но и в тормозных дисках, подшипниках скольжения, деталях двигателей, арматуре нефте- и газопроводов и прочее.

Прочность композиций зависит от способности матрицы передавать и перераспределять касательные напряжения на волокна. Она также зависит от отношения длины волокна к диаметру, от средней прочности волокна и от объёмной доли волокна [2, 5, 6, 9].

Используемая матрица в ПКМ обеспечивает связь армирующего материала, а также передачу и распределение напряжения в его объёме. Армирующие наполнители (тонкие непрерывные волокна, нити, ткани и жгуты) несут на себе основные нагрузки, обеспечивают физико-механические характеристики материала – высокую прочность и жёсткость в направлении

ориентации волокон. ПКМ состоят из армирующего материала на основе угле-, стекло-, арамидно- базальтовых тканых с термоотверждающейся (полиэфирной, винилоэфирной, фенольной, эпоксидной) или термопластичной РЕЕК (полиэфироэфиркетон), PPS (полифенилен сульфид), PEL (полиэфиримид) и т.д. матрицей. Армирующие материалы в зависимости от необходимых или заданных нагрузок имеют разные плотности, модули упругости, направления (однонаправленные, саржа, плейн, твил, мультиаксиальные и др.).

Проблемы механической обработки ПКМ, в первую очередь, связаны с особенностью процесса резания непластичных композиционных материалов. Поскольку в настоящее время материал ещё мало изучен, а свойства его представляют собой уникальную композицию физических, химических, механических и других свойств, работоспособность изделий из ПКМ во многом зависит от результатов финишной механической обработки.

Анализ выполненных известных результатов исследований механической обработки ПКМ и опыт промышленности показывают, что: на сегодняшний день не изучены физические процессы в зоне резания; не существуют проверенные на практике технологические рекомендации по назначению режимов резания, структур операций, условий обработки, методов обработки; нет рекомендаций по выбору оборудования, режущего инструмента; нет экономической оценки эффективности обработки.

Обработка ПКМ отлична по многим аспектам относительно обработки металлов. Пластики – это не однородные материалы, а состоящие из многих различных фаз. Армирующие волокна, прочные и хрупкие, могут обладать низкой теплопроводностью, как в случае с арамидными стекловолокнами. С другой стороны, полимерная матрица не прочная и, в определённой степени относительно армирующего материала, пластичная. Её теплопроводные свойства низкие, что, в конечном итоге, влияет на выбор производственного процесса и шероховатость обработанной поверхности, а недопустимость использования высоких температур является ограничивающим фактором в процессах постотверждения [4, 5, 7].

Обработываемость пластика определяется, в основном, физическими и механическими свойствами волокна и матрицы, содержанием волокна и его направлением. В то время как стекло и углеволокно разрушаются перед режущей кромкой, более жёсткие и прочные арамидные волокна накапливаются перед режущей кром-

кой. Следовательно, на качество обработанной поверхности значительно влияют тип армирования и его направления. Режущие силы зависят от используемого волокна, так как прочность матрицы не оказывает сильного влияния.

На температуры резания также влияют теплопроводные свойства и направление волокон. Углеродные волокна имеют больше возможности проводить тепло вдоль оси резания, чем стекло или арамидные волокна и, как следствие, могут лучше рассеивать тепло из зоны резания. Полимерные матрицы не имеют возможности выдерживать высокие температуры, часто встречаемые при обработке металлов, и необходимо соблюдать особые условия при их обработке и не подвергать матрицу излишнему нагреву в течение длительного времени. При применении СОТЖ влагопоглощение матрицы или волокна могут изменить форму, стабильность размеров и механические свойства обрабатываемого изделия [5, 12].

Различные коэффициенты теплового расширения матрицы и волокон образуют термические нагрузки, которые могут привести к деформации и повреждению поверхности изделия и всего изделия в целом.

Качество обработанной поверхности является определяющим фактором при оценке возможности обработки пластиков. Термин «качество» относится как к геометрическим свойствам, так и к степени повреждения материала, вызванного процессом обработки. Измерение обоих критериев для пластиков более сложное, чем для металлов из-за неоднородной структуры первого. На сегодняшний день не существует общепринятых стандартов технологий измерения и характеристик параметров качества. Кроме параметров шероховатости поверхности, имеют место такие характеристики, как расслоение, «разломачивание», задиры и др. [5].

Расслоение образуется вследствие низкой межслоевой прочности композиционной структуры и высокими воздействующими силами при обработке. Данные силы, в свою очередь, образуются вследствие применения неправильной стратегии резания (скоростей подачи), неправильной геометрии инструмента и его износа.

Материал, из которого производится инструмент, при обработке композитов должен выдерживать абразивность волокон и другие факторы, которые участвуют в процессе резания при обработке ПКМ. Геометрия инструмента должна обеспечивать правильный угол для необходимого сдвига (среза) волокон. Эти два требования кардинально отличаются от требо-

ваний, применяемых при обработке металлов [1, 5, 6, 10].

Абразивные круги часто применяются при обработке пластиков, так как они создают меньше механических повреждений и обеспечивают более высокое качество поверхности, чем лезвийная механическая обработка.

При механической обработке ПКМ полимерная матрица в армированном композите создаёт меньшее сопротивление обработки вследствие меньшей прочности и жёсткости, по сравнению с армирующими волокнами. Она оказывает значительное влияние на тип образования стружки. Помимо этого, вследствие её тепловых свойств (связующих), особенно теплопроводности, полимерная матрица играет важную роль при определении температуры в зоне резания. На поведение полимеров при обработке оказывают воздействие такие параметры процесса как: материал инструмента; угол его режущей части; радиус округления режущей кромки; глубина резания; скорость резания и скорость подачи.

Необходимо также учитывать влияние реологических (состав компонента) и тепловых свойств полимеров на образование стружки. Механическое поведение терморезактивных и термопластичных матриц к применяемым нагрузкам кардинально различается. Терморезактопласты характеризуются хрупкостью с очень низким коэффициентом удлинения, в то время как термопластические матрицы, благодаря своей пластической структуре, могут достигать коэффициента в несколько сотен процентов.

В зависимости от вязкости предельная прочность и коэффициент удлинения полимеров также зависит от степени применения нагрузки. Прочность материала повышается, а предельное удлинение уменьшается по мере увеличения степени деформации. Другими словами, в материале происходит переход из мягкого состояния в хрупкое при увеличении степени деформации. Из-за этой разницы тип образуемой стружки и качество обработанной поверхности различных типов полимеров будет сильно различаться с определёнными параметрами обработки.

Увеличение угла в плане и уменьшение глубины резания сказываются на уменьшении количества деформаций, которые происходят при формировании стружки. Повышение скорости резания влияет на процесс обработки двумя противоположными способами: с одной стороны, материал показывает высокую степень натяжения и в результате рушится при более низком натяжении, или становится хрупким, с дру-

гой стороны, создаваемое тепло повышает температуру в зоне резания, увеличивает молекулярные цепочки материала и, как следствие, повышает текучесть.

Рост температуры в полимере будет выше в случае применения количества тепла, равному объёму полимера. В процессе механической обработки тепло генерируется (выделяется) посредством сдвигов в первоначальной зоне деформации и, вследствие трения между стружкой и поверхностью инструмента, и между изделием и задним углом инструмента. При механической обработке металлов большая часть данного тепла (вплоть до 70 % при высокой скорости резания) удаляется из области резания за счёт стружкообразования. При механической обработке пластиков, благодаря их низкой теплопроводности, тепло генерируется в первоначальной зоне сдвига и медленно передаётся инструменту. Это необходимо учитывать в конструкции и материале державки режущего инструмента [3, 5, 7, 11].

Терморезактивные пластики создают некоторую пластичную деформацию до момента излома, но не в той степени, которая требуется для создания непрерывной стружки. И поэтому они классифицируются как хрупкие. А термопластики, наоборот, показывают значительную эластичную пластическую деформацию до излома, что очень сильно влияет на саму обработку композитов в пропорциональной их объёмной доле в композитах.

При обработке полимеров и композитов из них, эластичная деформация играет значительную роль при определении режущих сил, особенно в третичной зоне деформации из-за эластичного восстановления (упругая деформация), имеет значительное трение в этой зоне и в результате повышение температуры стеклования, что приводит к потере свойств (жидкое состояние) матрицы на данном участке. Тем не менее, концепция сдвига в плоскости была применена с некоторым успехом при анализе обработки пластиков, но лишь для весьма ограниченного состава их матрицы.

Структура ПКМ, особенности её формирования, анизотропия свойств, связанная с различной реакцией составляющих компонентов на действие температурных и силовых факторов, а также определённая направленность армирующих элементов оказывают особое влияние на физические процессы в зоне резания, построение технологических процессов, выбор оборудования и материала режущего инструмента, а также его геометрии [1, 3, 5, 8, 10].

Учитывая это, к геометрии и материалу ре-

жущей части инструмента предъявляются особые требования. Для облегчения ровной обрезки волокон требуется острая режущая кромка и положительный передний угол инструмента, а для устойчивости к абразивной способности волокон и прерывистым нагрузкам, порождаемым их разрушением, требуется инструментальный материал с высокой твёрдостью и ударной вязкостью.

Материал, из которого производится инструмент, при обработке композитов должен выдерживать абразивность волокон и факторы, которые участвуют в процессе резания при обработке ПКМ. Геометрия инструмента должна обеспечивать угол для необходимого сдвига (среза) волокон. Эти два требования кардинально отличаются от требований, применяемых при обработке металлов.

Результаты многих исследований и опыт промышленности [1, 3, 4, 5, 8, 10] показывают, что при обработке ПКМ синтетический спечённый алмаз ПКА (АСПК), если отсутствуют сколы или разрушения, которые определяются его качеством, подвергается наименьшей степени износа. На втором месте, с небольшой разницей, находится кубический нитрид бора (КНБ) – эльбор-Р, -РМ, 05ИТ, гексанит-Р. Затем следует керамика на основе оксида алюминия и диоксида циркония.

Твёрдые сплавы с покрытием и без него значительно уступают по эксплуатационным свойствам инструментам, изготовленным из ПКА и КНБ. Отдельно следует отметить твёрдосплавный инструмент с алмазоподобным покрытием (DKL), который имеет достаточно высокую износостойкость и приближается к ПКА и КНБ. Однако этот инструмент значительно дороже, учитывая сложность технологий покрытия, и не всегда отличается высоким качеством – происходит отслаивание алмазоподобной плёнки.

Ведутся активные работы по созданию состава твёрдосплавной основы с переходной зоной, которая могла бы уменьшить несоответствие коэффициентов теплового расширения алмазоподобного покрытия и твёрдого сплава, что считается главной причиной возникновения термического напряжения и приводит к отслаиванию покрытия от основы.

Характерным отличием обработки углепластиков является отсутствие участка катастрофического изнашивания резцов. Наблюдаются лишь два участка изнашивания: интенсивного изнашивания (в первые минуты работы приработка) и нормального рабочего изнашивания. Исходя из этого, а также из того, что одним из главных критериев работоспособности режущей

го инструмента является его износостойкость, было предложено использовать для обработки углепластиков инструмент из углеродистых и легированных сталей, например, У12А и ХГТ, с покрытием режущей поверхности инструмента карбидом титана (TiC) или нитридной керамикой. Такой инструмент в 8...10 раз дешевле инструмента из ПКА и КНБ.

Как известно, износ инструмента приводит к таким нежелательным последствиям, как уменьшение прочности режущей кромки, увеличение сил, действующих на инструмент, и потребляемой мощности, повышение температуры резания, снижение качества обработки поверхности, ухудшение размерной точности детали и, в конечном итоге, снижение производительности.

При механической обработке углепластиков наиболее распространёнными видами износа в зависимости от используемого инструментального материала, являются округление режущей кромки, вызываемое постепенным истиранием образующих режущую кромку поверхностей, образование фаски износа по задней поверхности инструмента, которая, как правило, почти параллельно направлению резания. Её ширина точно отражает изменения в свойствах заготовки по длине контакта. Износ по задней поверхности может быть неоднородным вдоль режущей кромки. При обработке, например, углепластиков, видимая изогнутость износа по задней поверхности отражает различия в характеристиках износа волокна и полимерной фазы в разных слоях.

Другим видом износа, который проявляется при механической обработке углепластиков, является образование сколов на режущей кромке инструмента. Данный вид износа наиболее распространён, когда режущий инструмент не обладает достаточной ударной прочностью, когда глубина резания велика, а также в условиях прерывистого резания. Кроме того, сколы образуются при значительном износе по задней поверхности и износе по передней поверхности инструмента, например, твёрдосплавных с алмазоподобным покрытием. При этом резко уменьшается поперечное сечение режущей кромки и происходит её скол (сколы).

На рис.1 показана схема износа реза из твёрдого сплава группы ТК с алмазоподобным покрытием при обработке ПКМ с разнонаправленными волокнами из углепластика. Деструкция полимерного связующего материала при резании, в результате которой образуется вязкотекучий в микрообъёмах полимер, являющийся поверхностно-активным веществом

(ПАВ), уменьшает поверхностную энергию материала инструмента, что облегчает отрыв от его поверхности отдельных микро- и макрочастиц. В результате этого возникает механохимический адсорбционный износ инструмента с образованием лунки на его передней поверхности и фаски – на задней поверхности. При достижении размера лунки и фаски в направлении режущего клина больше критической, происходит микроскол режущего лезвия.

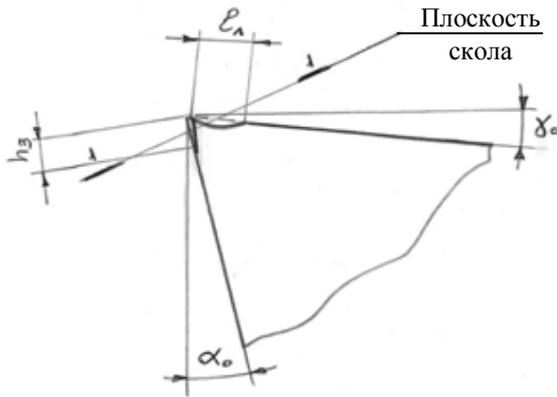


Рис. 1. Схема образования фаски и лунки износа, приводящие к сколам режущей кромки инструмента

На рис. 2 показаны результаты экспериментальных исследований по износостойкости режущего инструмента, оснащённого различным инструментальным материалом при токарной обработке углепластика УГЭТ.

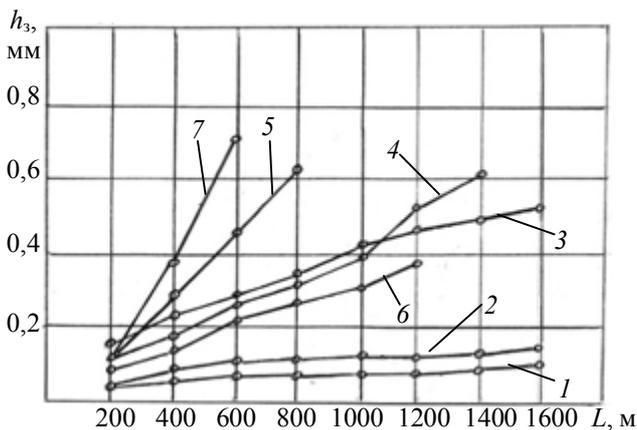


Рис. 2. Износ различных инструментальных материалов при токарной обработке углепластика УГЭТ: 1 – АСПК; 2 – КНБ (эльбор-Р; эльбор-РМ); 3 – керамика; 4 – У12А+TiC; 5 – твёрдый сплав ТК+TiN; 6 – ВК+алмазоподобное покрытие; 7 – ВК+TiN.

На основании выполненных исследований, а также обработки подобных заготовок в производственных условиях были установлены допустимые критерии износа резцов из АСПК:

для черновой обработки  $h_3 = 0,1...0,2$  мм; для чистовой обработки  $h_3 = 0,08...0,1$  мм. Для резцов из КНБ (эльбор-Р и эльбор-РМ): для черновой обработки  $h_3 = 0,15...0,3$  мм; для чистовой обработки  $h_3 = 0,06...0,1$  мм.

Работа данными резцами со степенью износа в рекомендуемых пределах обеспечивает получение поверхности изделий из углепластика требуемого качества – без сколов, расслоений, «разломачивания» с параметрами шероховатости поверхности  $Rz = 20...10$  мкм при предварительной обработке и  $Ra = 0,8...1,2$  мкм при чистовой обработке.

Таким образом, износ режущего инструмента при механической обработке углепластиков происходит, в основном, за счёт абразивного истирания и микроразрушения. Абразивный износ возникает вследствие трения поверхности инструмента под давлением об абразивный волокнистый материал, внедрённый в полимерную матрицу, а также вследствие истирания незакреплённым абразивом, образуемым обломками волокон и матрицы. Абразивный износ проявляется в виде отчётливого закругления режущей кромки, а также в виде фасок износа на передней и задней поверхностях инструмента. Эти фаски износа часто характеризуются неглубокими канавками, идущими в направлении резания и указывающими на изменение в микроструктуре заготовки по всей её толщине.

При механической обработке волокнистых полимеров наблюдается процесс колебания сил резания, частота которых зависит, в первую очередь, от ориентации волокон. Амплитуда и частота колебаний силы резания  $Pz$  при обработке со скоростью резания, направленной параллельно волокнам, инструментом с положительным передним углом свидетельствуют об отслаивании, изгибе и разрушении волокон, происходящих на передней поверхности инструмента.

При резании волокон с положительной ориентацией сила резания отражает изменения в процессе сдвига и разрушения волокнистых и связующих материалов с изменением ориентации волокон. Осевая сила определяет взаимодействие между обрабатываемой поверхностью и задней поверхностью режущего инструмента. Амплитуда колебаний силы резания уменьшается с увеличением угла ориентации волокон, а затем увеличивается при резании волокон с ориентацией  $90^\circ$  и больше. Следует отметить, что характер колебаний силы при резании волокон с большим углом ориентации (более  $90^\circ$ ) отличается от резания волокон с малым поло-

жительным углом ориентации ( $0...75^\circ$ ). При резании волокон с большим положительным углом ориентации большие амплитуды колебаний связаны с большими удельными давлениями в зоне сдвига и сдвигом волокон, а также с растрескиванием матрицы.

При применении моделей плоскости сдвига к механической обработке однонаправленных композитов существуют два ограничения:

– сдвиг имеет место только для ограниченного диапазона направлений волокон от  $10^\circ$  до  $75^\circ$ . Поэтому данную модель нельзя применять для всех возможных направлений волокон в композитах ( $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ );

– межповерхностный сдвиг происходит вдоль поверхности раздела между волокном и матрицей. Это приводит к скольжению стружки вверх по передней поверхности инструмента. При этом угол плоскости сдвига принимается равным углу ориентации волокон независимо от принципа минимума энергии. Таким образом, результаты исследования дают приемлемое совпадение с экспериментальными данными только в диапазоне направлений волокон от  $10^\circ$  до  $60^\circ$ .

Стружкообразование при резании волокон с положительным углом ориентации ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) происходит в процессе сжатия с последующим сходом стружки вверх по передней поверхности инструмента за счёт межслоевого сдвига вдоль поверхности раздела между волокном и матрицей.

Качество поверхности при механической обработке ПКМ зависит от направления траектории движения подачи инструмента и направления волокон армирующих элементов [7, 8]. При неблагоприятном сочетании этих движений возможно появление следов разрыва волокон, выброса на поверхность фрагментов основы компонентов ПКМ и ухудшение характеристик шероховатости поверхности.

На качество обработанной поверхности изделий из ПКМ оказывает влияние радиус округления режущей кромки, радиус при вершине резца и другие его геометрические параметры. Кроме того, необходимо строго регламентировать величину износа инструмента на передней или задней поверхности, что влияет не только на качество получаемой поверхности детали, но и в целом на эффективность всего процесса обработки.

### Выводы

1. Анизотропия свойств ПКМ определяет различия процессов резания, в частности про-

цесса стружкообразования, при обработке вдоль и поперёк армирующих волокон.

2. Малая теплопроводность большинства ПКМ, которая обуславливает слабый отвод тепла из зоны резания со стружкой и в обрабатываемое изделие, определяет требование к режущему инструменту, конструкции державки резца и её сечению, который должен интенсивно отводить выделяющееся в зоне резания тепло.

3. При обработке ПКМ кроме абразивного возникает механический адсорбционный износ инструмента, что необходимо учитывать при выборе материала его режущей части. Наиболее лучшим материалом сегодня являются АСП и КНБ.

4. Склонность к упругому восстановлению обрабатываемой поверхности ПКМ приводит к появлению больших площадок контакта на задних поверхностях инструмента. Это определяет высокий уровень сил трения на задней поверхности инструмента и как следствие высокую интенсивность изнашивания инструмента по задней поверхности.

5. Характеристики шероховатости поверхности, образующиеся при обработке ПКМ, зависят от геометрии режущего инструмента, главным образом радиуса округления его режущей кромки, скорости резания, глубины и скорости подачи, а также от направления волокон армирующих элементов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Зубарев, Ю.М.** Современные инструментальные материалы. – СПб.: Изд-во «Лань», 2014. – 304 с.
2. **Зубарев, Ю.М.** Технологическое обеспечение надёжности эксплуатации машин. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 320 с.
3. **Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С.** Особенности технологии механической обработки углепластиков // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5, С.3–33.
4. **Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С.** Качество поверхности при обработке резанием полимерных композиционных материалов // Справочник. Инженерный журнал. – 2016. – №9. – С. 3–11.
5. **Механическая** обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов. – Сумы: Изд-во ИТД. «Университетская книга», 2013. – 97 с.
6. **Старков, В.К.** Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
7. **Приемышев, А.В., Заостровский, А.С.** Особенности механической обработки высокотехнологичных полимерных материалов на основе углеродистого волокна с термо-

пластичной матрицей // Наука и образование: инновации, интеграция и развитие. – 2014. – №1. – С. 174–179.

8. **J. Davim and P. Reis** “Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments”, *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 160. no. 2. pp. 160–167. Mar. 2005.

9. **N. Bhatnagar** “On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. vol. 35. no. pp. 701–716, May 1995.

10. **J. Davim, P. Reis and C.C. Antonio** “Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up”. *Composites Science and Technology*, vol.64. no.2. pp. 289–297. Feb.2004.

11. **P. Ghidossi, M. Elmansori, and E. Pierron** “Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 7–8, pp. 989–999, Jul. 2004.

12. **P. Guegan, L.E. Maitre and J.C. Hamann** “Contribution à L’usinage des matériaux composites”. 1992. *Actes de Colloques*. pp. 7–9.

## REFERENCES

1. Zubarev, Yu.M. *Modern Tool Materials*. – S-Pb.: “Lan” Publishing House, 2014. – pp. 304.

2. Zubarev, Yu.M. *Technological Support of Machine Operation Reliability*. – S-Pb.: “Lan” Publishing House, 2016. – pp. 320.

3. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities of carbon plastic machining technology. – *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016. - №5, pp. 3–33.

4. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Surface quality at polymeric composite material cutting. Reference Book. *Engineering Journal*. – 2016. – №9. – pp. 3–11.

5. *Composite Material Machining at Aircraft Assemblage*. – Sumy: ITD Publishing House. “University Book”, 2013. – pp. 97.

6. Starkov, V.K. *Physics and Optimization of Material Cutting*. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 640.

7. Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Machining peculiarities of science intensive polymeric materials based on carbon fiber with thermo-plastic matrix // *Science and Education: Innovations, Integration and Development*. – 2014. – №1. – pp. 174–179.

8. J. Davim and P. Reis “Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments”, *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 160. no. 2. pp. 160–167. Mar. 2005.

9. N. Bhatnagar “On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. vol. 35. no. pp. 701–716, May 1995.

10. J. Davim, P. Reis and C.C. Antonio “Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up”. *Composites Science and Technology*, vol.64. no.2. pp. 289–297. Feb.2004.

11. P. Ghidossi, M. Elmansori, and E. Pierron “Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 7–8, pp. 989–999, Jul. 2004.

12. P. Guegan, L.E. Maitre and J.C. Hamann “Contribution à L’usinage des matériaux composites”. 1992. *Actes de Colloques*. pp. 7–9.

Рецензент д.т.н. П.Ю. Бочкарев

