

Научные технологии в машиностроении. 2023. №9 (147). С.27-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №9 (147). P. 27-38.

Научная статья
УДК 621.923.9
doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-38

Инновационные технологии повышения производительности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов

Владимир Федорович Макаров¹, д.т.н.

Михаил Владимирович Песин², д.т.н.

Артем Александрович Волковский³, аспирант

^{1, 2, 3} Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

¹ makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

² m.pesin@mail.ru: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ VolkovskiiWork@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В работе решена актуальная задача повышения производительности и качества обработки новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углепластика при обработке деталей ракетно-космической и авиационной техники. Одним из прорывов российского отечественного машиностроения является внедрение элементов крыла нового гражданского лайнера МС-21, производство корпусов шумоглушения, лопаток компрессора и других деталей газотурбинных двигателей из углепластика, требующих проведения высококачественной и производительной механической обработки. Механическая обработка данных изделий включает в себя сложности, вызванные требованиями конструкторской документации по обеспечению необходимой шероховатости, отсутствия дефектов обработанной поверхности и высокой прочности окончательно обработанной детали. В данной статье представлены результаты исследования применения высокопроизводительной технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ на основе углеволокна. Определена рациональная геометрия лезвийного режущего инструмента для предварительной черновой обработки ПКМ. Разработана адекватная эмпирическая математическая модель влияния режимов резания при фрезеровании на шероховатость поверхностного слоя, а также определены рациональные режимы обработки. Представлены результаты экспериментальных исследований абразивной обработки ПКМ жесткими шлифовальными кругами из электрокорунда белого, карбида кремния зеленого и эльбора. Представлены зависимости шероховатости поверхностного слоя от режимов шлифования. По результатам исследований согласно разработанной математической модели определены рациональные характеристики шлифовальных кругов и режимы обработки. Впервые рассмотрены вопросы влияния дефектов механической обработки на прочность ПКМ. Представлены сравнительные испытания на прочность при растяжении и разрыве образцов, изготовленных традиционной лезвийной обработкой и последовательной лезвийно-абразивной обработкой. Доказано повышение прочности на растяжение и разрыв деталей из ПКМ, изготовленных согласно технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки на 20...30 % по сравнению с традиционной лезвийной обработкой.

Ключевые слова: последовательная лезвийно-абразивная обработка, полимерные композиционные материалы, абразивная обработка ПКМ, шлифование, фрезерование ПКМ, механическая обработка

Для цитирования: Макаров В.Ф., Песин М.В., Волковский А.А. Инновационные технологии повышения производительности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 27–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-38

Innovative technologies for improving the efficiency and machining operating quality for polymer composite materials

Vladimir F. Makarov¹, D. Eng.

Mikhail V. Pesin², D. Eng.

Artem A. Volkovsky³, PhD student

^{1, 2, 3} Perm National Research Polytechnic University

¹ makarovv@pstu.ru

² m.pesin@mail.ru

³ VolkovskiiWork@mail.ru

Abstract. An urgent problem for improving the efficiency and machining operation quality for new polymer composite materials (PCM) based on carbon fiber in the operation of rocket and space equipment and aircraft engineering parts is solved in the article. One of the breakthroughs of the Russian domestic engineering is the introduction of wing elements of the new MS-21 civil airliner, the production of noise suppression bodies, compressor blades and other parts of gas turbine engines made of carbon fiber, requiring high-quality and productive machining. Machining operation of these products involves difficulties caused by the requirements of the design documentation to ensure the necessary degree of roughness, soundness of the machined surface and high strength of the finish-machined component. This article presents the results of a study of the application of high-performance technology of sequential blade-abrasive processing of carbon fiber-based PCM products. This article presents the results of a study of the application of high-performance technology of sequential blade-abrasive operation of carbon fiber-based PCM products. The rational geometry of the blade cutting tool for primary machining of the PCM is determined. An adequate empirical mathematical model of cutting modes influence on the surface layer roughness in the milling operation has been developed, as well as rational processing modes have been determined. The results of experimental studies of the abrasion of PCM with rigid grinding wheels made of white electrocorundum, green silicon carbide and elborum are presented. The dependences of the surface layer roughness on the grinding modes are given. According to the research results and the developed mathematical model, the rational characteristics of grinding wheels and processing modes are determined. For the first time, the issues of the influence of machining defects on the strength of PCM are viewed. Comparative tensile and tear strength tests of samples made by traditional edge cutting machining and sequential edge-cutting-abrasive operation are presented. The increase in tensile and tear strength of PCM parts manufactured according to the technology of sequential edge-cutting-abrasive operation by 20...30 % compared to traditional edge-cutting operation has been proved.

Keywords: sequential edge-cutting-abrasive operation, polymer composite materials, abrasion of PCM, grinding, milling of PCM, machining

For citation: Makarov V.F., Pesin M.V., Volkovsky A.A. Innovative technologies for improving the efficiency and machining operating quality for polymer composite materials / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 9 (147). P. 27–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-38

Введение

Настоящие темпы развития машиностроительной отрасли на территории Российской Федерации влекут за собой необходимость быстрой разработки и внедрения инновационных технологий в производственные процессы предприятий. Однако, несмотря на высокий уровень квалификации инженерно-технического состава, наиболее актуальным является вопрос освоения технологий механической обработки новых конструкционных материалов. Наибольшее развитие в данном направлении получают композиционные материалы на полимерной основе [1, 2]. Полимерные композиционные материалы представляют собой двухсоставной элемент, заключающий в себе полимерную матрицу и

армирующие волокна, соединенные между собой на основе адгезионного сцепления при высокотемпературном прессовании. Комбинация вышеуказанных материалов позволяет обеспечить совокупность низкой массы и высокой прочности изделия, что влияет на повышение энергосиловых характеристик машин, путем замещения традиционных материалов и сплавов композитами [3].

Наиболее передовыми направлениями в машиностроительной отрасли, где композиты на полимерной матрице получили широкое применение, является авиастроение в конструкции нового магистрального лайнера MS-21, новых авиадвигателей ПД8, ПД-14 и ПД-35, автомобилестроение в виде разработок кузовов, бамперов и других деталей из углепластика, в конструкциях изделий военно-

промышленного комплекса, обечаек и корпусов ракетно-космической техники.

В свою очередь, ввиду особых анизотропных свойств полимерных композитных материалов (ПКМ) при механической обработке этих материалов возникает много проблем с обеспечением качества поверхностного слоя и образования дефектов. Оказалось, что прочности адгезионных связей между углеволокном и полимерной матрицей недостаточно при механической обработке. Происходит разрушение поверхностного слоя с образованием дефектов. К основным типам дефектов относятся деламинация крайних слоев, ворсистость обработанной поверхности, термострукция и образование микротрещин в матрице композита [4 – 6].

При исследовании причин возникновения и разработки методики устранения вышеуказанных дефектов определены основополагающие факторы, которые оказывают непосредственное влияние на качество обработанной поверхности. К ним относятся: геометрия режущего инструмента, твердость режущего инструмента и режимы механической обработки [6].

По результатам литературного обзора установлено, что обеспечение показателей качества поверхностного слоя, достигается путем применения высокоскоростного фрезерования, применения методики термомеханического воздействия, разработки специальной геометрии режущего инструмента и применения сверхтвердых режущих материалов. Каждая из представленных технологий не исключает образование дефектного слоя и сопровождается трещинами в матрице, деламинацией и другими отклонениями от требований конструкторской документации.

Одним из эффективных методов механической обработки ПКМ является абразивная обработка гибким инструментом. Однако применение гибких лепестковых шлифовальных кругов является безразмерной обработкой и не может применяться в серийных технологических процессах ввиду отсутствия контроля над снимаемым припуском и, как следствие, над производительностью процесса.

На основании проведенного анализа механической обработки ПКМ различными лезвийными инструментами предполагается, что

обработка жестким абразивным инструментом, позволит обеспечить наилучшую шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,4 \dots 0,8$ мкм и точность IT6, IT7, однако, этот метод механической обработки является малоисследованным [7 – 9]. При предварительном сопоставлении показателей качества, полученных при обработке лезвийным и абразивным инструментом, последний занимает преимущественную позицию.

Повышение качества поверхностного слоя при абразивной обработке обеспечивается за счет применения высоких скоростей резания 35...50 м/с, что превосходит лезвийную обработку в 10 – 15 раз, а так высокое режущее воздействие на перерезаемые тонкие волокна углепластика острой и твердой режущей кромки абразивных зерен. В результате, абразивное зерно перерезает с высокой скоростью весьма твердое углеволокно ПКМ не деформируя, не вытягивая и не ломая его, что, как доказано, происходит при лезвийной обработке [8].

В тоже время, стоит отметить, что применение абразивной обработки не позволяет снимать большие припуски с заготовки, требуется проведение большого числа проходов, что влияет на снижение производительности механической обработки. Отсюда следует, что обеспечение высокой производительности технологического процесса механической обработки может быть достигнуто путем применения последовательной лезвийно-абразивной обработки. Эффективность данной технологии возникает в результате снятия большого припуска на черновом этапе обработки и последующей финишной обработкой жестким шлифовальным кругом с целью устранения дефектов и повышения качества поверхностного слоя и прочности деталей из ПКМ. Эти предположения необходимо проверить экспериментально.

Методика проведения экспериментального исследования

В основу экспериментальных исследований заложен сравнительный анализ качества поверхностного слоя по параметру шероховатости Ra , полученного в результате механической обработки тремя видами специального лезвийного режущего инструмента для

обработки композитов и различных видов абразивного инструмента. В работе использовался метод применения полного факторного эксперимента вида 2^3 . Определялась рациональная геометрия и режимы лезвийной обработки. Также проводился сравнительный анализ качества поверхностного слоя по шероховатости при обработке жесткими

шлифовальными кругами, где определялись рациональные характеристики шлифовальных кругов и режимов резания. Эксперименты проводились по плану 2^3 в виде восьми опытов с получением линейной математической модели зависимости шероховатости от переменных режимов резания (табл. 1).

1. Матрица планирования 2^3

1. Planning matrix 2^3

№ опыта	x_0	Планирование							Параметр Ra , мкм		
		x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}
1	+1	-	-	-	+	+	+	-			
2	+1	+	-	-	-	-	+	+			
3	+1	-	+	-	-	-	-	+			
4	+1	+	+	-	+	+	-	-			
5	+1	-	-	+	+	+	-	+			
6	+1	+	-	+	-	-	-	-			
7	+1	-	+	+	-	-	+	-			
8	+1	+	+	+	+	+	+	+			

В качестве переменных факторов приняты такие режимы лезвийной обработки фрезерованием как глубина резания t , мм; частота вращения шпинделя n об/мин (диаметр фрезы 10 мм); минутная подача S , мм/мин. Уровни варьирования факторов представлены в табл. 2. В качестве переменных факторов,

влияющих на качество поверхностного слоя при абразивной обработке, определены: глубина шлифования на проход t , мм; скорость подачи стола S , м/мин; зернистость F шлифовального круга. Уровни варьирования представлены в табл. 2.

2. Уровни варьирования факторов

2. Levels of factors variation

Вид обработки	Лезвийная обработка (фрезерование)			Абразивная обработка (плоское шлифование)		
	$X1$ n , об/мин	$X2$ S , мм/мин	$X3$ t , мм	$X1$ F	$X2$ t , мм	$X3$ S , м/мин
Основной уровень	1250	100	2,0	63	0,15	7,5
Интервал варьирования	990	35	1,0	17	0,1	2,5
Верхний уровень	2240	135	3,0	80	0,25	10
Нижний уровень	260	65	1,0	46	0,05	5,0

В качестве обрабатываемого материала принимался углепластик ВКУ-39 с укладкой слоев 0/45/90/-45. Станочное оборудование и средства технического оснащения представлены (СТО) в табл. 3. Станочное оборудование модернизировано дополнительно

системой вытяжки отработанных продуктов в виде пыли при резании ПКМ с целью обеспечения дополнительной защиты здоровья оператора (рис. 1).

3. Средства технического оснащения экспериментального исследования

3. Means of technical equipment of experimental research

Оборудование и СТО	Наименование	Назначение
Универсально-фрезерный станок	JET 1452TSDRO	Предварительная обработка ПКМ фрезерованием
Фреза роутер для обработки ПКМ, диаметр 10 мм	Концевая	
	Роутер	
Плоскошлифовальный станок	Концевая прямоугольная $Z = 6$	Финишная обработка ПКМ плоским шлифованием
	JETJPSG 1224H	
Режущий инструмент 300×76×40мм	25AF46G14V 35 2250 25AF46K 7 V 35 2250 64CF60 K 7 V35 2250 25AF60 K 7 V 35 2250 64CF80 K 7 V35 2250 1A1-100/80 K5 V35	
Пирометр	BoschUniversalTerm	Измерение температуры в верхних слоях заготовки
Профилометр	MarSurf PS10	Оценка качества обработанной поверхности по параметру шероховатости Ra , мкм
Цифровой микроскоп	BM-200 LCD	Визуальная оценка наличия и вида дефектного слоя

Выбор параметров исследования обосновывается физико-механическими свойствами связующего материала композита, который представляет собой эпоксидную смолу. Последняя, относится к классу термореактивных полимеров, поэтому необходимо вести контроль температуры с целью снижения вероятности достижения температуры разложения смолы. Параметр шероховатости Ra

определен с учетом комплексности предоставляемой информации о качестве обработанной поверхности, в том числе и наличии дефектного слоя.

Общий вид проведения экспериментальных исследований при шлифовании на плоскошлифовальном станке типа ЗГ71 представлены на рис 1.

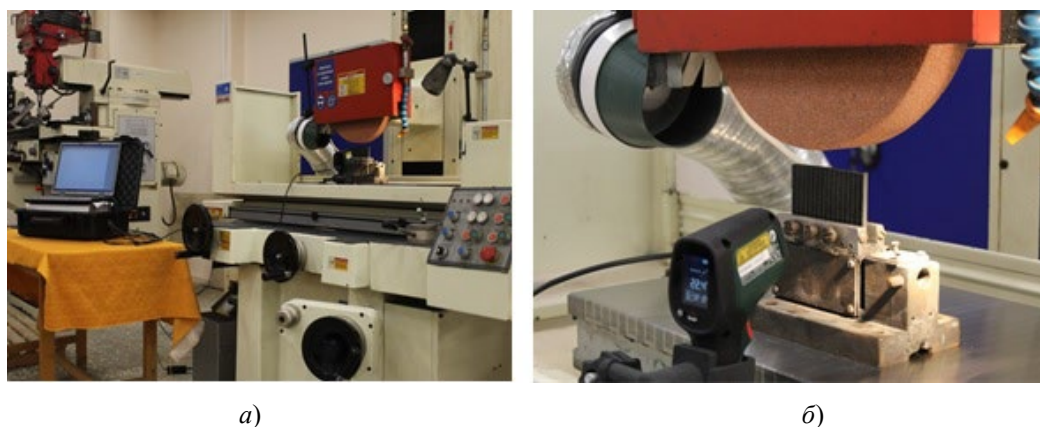


Рис. 1. Экспериментальная установка:

a – общий вид проведения исследований; b – зона обработки при плоском шлифовании

Fig. 1. Experimental apparatus:

a – general view of the research; b – cutting zone during flat grinding

Выбор параметров исследования обосновывается физико-механическими свойствами связующего материала композита, который представляет собой эпоксидную смолу. Последняя, относится к классу терморезактивных полимеров, поэтому необходимо вести контроль температуры с целью снижения вероятности достижения температуры разложения смолы. Параметр шероховатости Ra определен с учетом комплексности предоставляемой информации о качестве обработанной поверхности, в том числе и наличии дефектного слоя.

Общий вид проведения экспериментальных исследований при шлифовании на плоскошлифовальном станке типа 3Г71 представлены на рис 1.

Анализ результатов исследований

В результате проведенных сравнительных экспериментальных исследований фрезерования различными концевыми фрезами установлено, что наилучшие показатели шероховатость поверхностного слоя обеспечивает применение твердосплавной концевой прямозубой фрезы. Данный инструмент позволяет снизить шероховатость поверхностного слоя с $Ra = 1,303$ мкм до $Ra = 0,537$ мкм при прочих равных режимах обработки, что и стандартной концевой фрезой, и специальной фрезой роутером. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 4.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя Ra и время T при фрезеровании торцов заготовки из углепластика ВКУ-39

4. The results of experimental studies of cutting modes influence on the roughness of the surface layer Ra and the time T when milling the ends of a carbon fiber workpiece VCU-39

№	n , об/мин	S , мм/мин	t , мм	Ra_1 мкм	Ra_2 мкм	Ra_3 мкм	$Ra_{ср}$ мкм	T_1 , с	T_2 , с	T_3 , с	$T_{ср}$, с
1	260	65	1,0	0,566	0,583	0,579	0,576	35,8	35,5	36,0	35,8
2	2240	65	1,0	0,537	0,541	0,535	0,539	31,3	32,1	35,3	32,9
3	260	135	1,0	0,805	0,819	0,823	0,816	32,9	33,3	32,7	32,97
4	2240	135	1,0	0,611	0,618	0,619	0,616	26,5	28,1	29,2	27,9
5	260	65	3,0	0,692	0,683	0,68	0,685	42,3	40,0	40,2	40,8
6	2240	65	3,0	0,547	0,559	0,568	0,558	36,6	36,8	36,6	36,7
7	260	135	3,0	0,942	0,961	0,933	0,945	36,1	34,7	34,8	35,2
8	2240	135	3,0	0,886	0,9	0,906	0,897	32,8	33,5	32,7	33

При визуальном анализе поверхностного слоя под микроскопом обнаружено наличие дефектов, т. е. обработка фрезерованием лучшим

инструментом сопровождается образованием трещин между препрегами заготовки (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид трещин в поверхностном слое углепластика в результате фрезерования концевой прямозубой твердосплавной фрезой на рациональных режимах резания

Fig. 2. General view of cracks in the surface layer of carbon fiber as a result of milling with a straight-toothed solid-alloy milling cutter at rational cutting modes

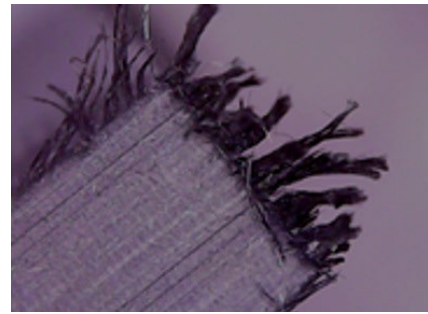
Кроме того, проявились дефекты, характерные для фрезерования в виде образования деламации и ворсистости крайних слоев заготовки (рис. 3).



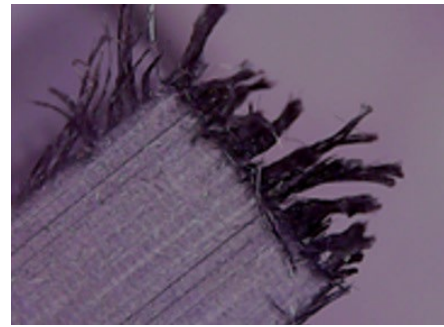
Рис. 3. Общий вид дефектов в виде деламации и ворсистости краевых слоев заготовки в результате фрезерования прямозубой фрезой при $n = 2240$ об/мин, $S = 65$ мм/мин и $t = 1,0$ мм

Fig. 3. General view of defects in the form of delamination and hairiness of the edge layers of the workpiece as a result of milling using a straight-toothed milling cutter at $n = 2240$ ob/min, $S = 65$ mm/min and $t = 1,0$ mm

Причинами образования этих дефектов является упругая деформация твердых армирующих волокон, хрупкое разрушение матрицы под действием силы давления передней поверхности режущих лезвий фрезы, что приводит к разрушению адгезионных связей матрицы и волокон, изгибу и вырыву волокон из матрицы, обрыву, поломки части волокон и частичному их разрушению. Наибольшую величину ворсистости можно наблюдать у выходной кромки, что говорит о накопительном характере упругой деформации волокон эффекте и предразрушении связующего композита в виде трещин (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Дефектообразование на входной и выходной кромке при обработке прямозубой фрезой для ПКМ: а – входная кромка; б – выходная кромка

Fig. 4. Defect formation on the input and output edges in the operation of a straight-tooth cutter for PCM: а – input edge; б – output edge

Стабильно течение процесса обработки, влечет за собой низкое образование дефектов на обработанной поверхности, располагающихся в теле заготовки, но не исключая их наличие на боковых кромках. Так же следует отметить, что основной причиной снижения параметра шероховатости обработанной поверхности является износ инструмента и образование трещин, что представлено на рис. 5.

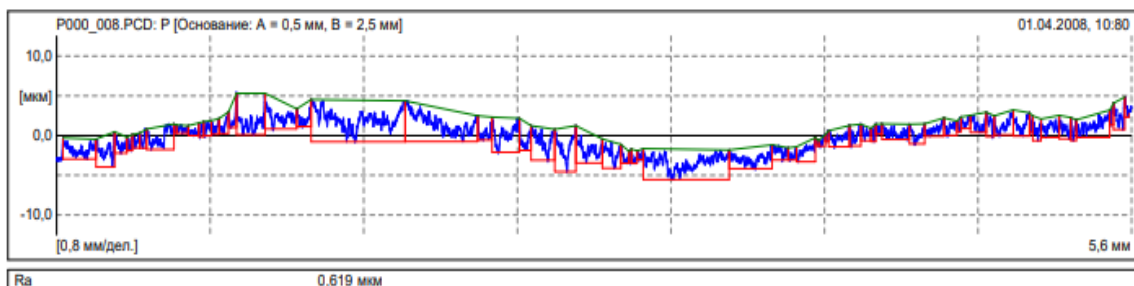


Рис. 5. Микронеровности обработанной поверхности

Fig. 5. Micro-roughness of the machined surface

Образование микронеровности в поперечном сечении заготовки вызвано трещинами в матрице полимерного

композиционного материала, что приводит к деламации и образованию волнистости поверхностного слоя (рис. 6).

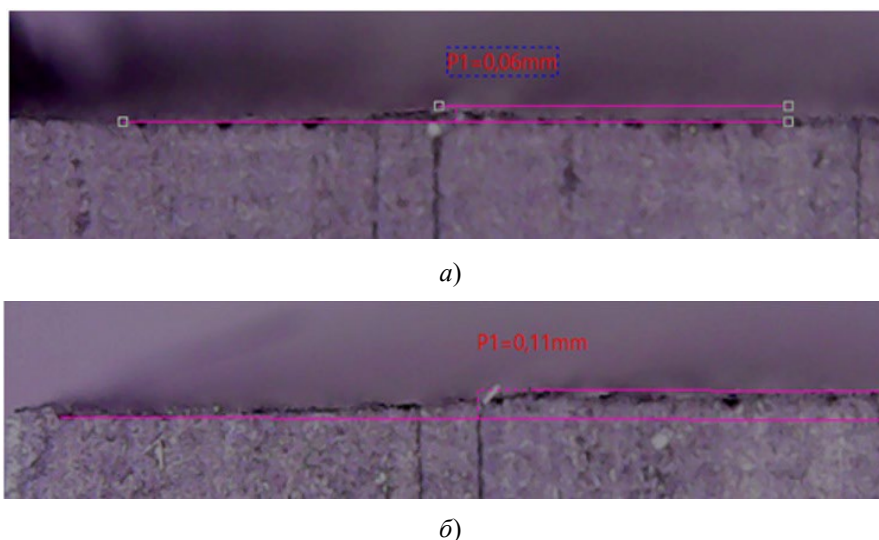


Рис. 6. Измерение высоты микронеровности в поперечном сечении в результате образования трещины между слоями заготовки при режимах обработки $n = 260$ об/мин, $S = 135$ мм/мин и $t = 3,0$ мм;

a – входная кромка; $б$ – выходная кромка

Fig. 6. Measurement of the height of the microroughness in the cross section as a result of the formation of cracks between the layers of the workpiece at processing modes $n = 260$ rpm, $S = 135$ mm/min and $t = 3$ mm;

a – input edge; b – output edge

Как можно отметить, в поперечном сечении заготовки по причине трещинообразования возникает возвышение и волнистость поверхности, достигающей в размере от 0,05 мм, до 0,15 мм. В дополнение к образованию микронеровностей обработанная поверхность содержит в себе элементы вырывания образованные вдоль линии микротрещины, что при измерениях параметра шероховатости представляет собой максимум впадины. На основании проведенного экспериментального исследования можно утверждать, что применение лезвийного инструмента при фрезеровании полимерных композиционных материалов из углепластика ВКУ-39 может сопровождаться использованием специальной твердосплавной концевой фрезой роутером при глубине резания $t = 1,0$ мм, частоте вращения шпинделя $n = 2240$ об/мин и подаче $S = 65$ мм/мин, что позволит обеспечить наилучшие показатели шероховатости обработанной поверхности.

В свою очередь, устранение дефектов поверхностного слоя в результате абразивной обработки исследовано с применением абразивных шлифовальных кругов из электрокорунда белого, карбида кремния зеленого и эльбора. Наихудшие результаты шероховатости обработанной поверхности в ходе экспериментальных исследований продемонстрировал шлифовальный круг из эльбора. Данное

явление может быть объяснено следующим механизмом протекания процесса резания: ввиду высокой твердости абразивного зерна исключается его износ и вырывание из связующего круга, что приводит к забиванию пор между абразивными частицами. Отсутствие явления самозатачивания влечет за собой рост упругих деформаций, т. к. снижается режущая способность периферии абразивного круга.

Упругие деформации, в свою очередь, вызывают рост сил резания и напряжений внутри заготовки, т. о. стимулируется повышение температуры и образование трещин, деламинации и термодеструкции на поверхностном слое заготовки. Аналогичную динамику течения процесса резания показывает применение в качестве материала абразивных частиц карбида кремния зеленого. На основании возникновения дефектов данного рода, вышеуказанные шлифовальные круги не рекомендуются к применению при абразивной обработке ПКМ.

Наиболее лучшие показатели шероховатости обработанной поверхности были достигнуты путем применения высокопористых шлифовальных кругов из электрокорунда белого 25AF46 G14 V35 2250. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 5.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов шлифования и характеристик шлифовальных кругов на шероховатость поверхностного слоя

5. Results of experimental studies of the effect of grinding modes and characteristics of grinding wheels on the roughness of the surface layer

№	F	t , мм	S , мм/мин	Ra_1 , мкм	Ra_2 , мкм	Ra_3 , мкм	Ra_{cp}
1	46	0,05	5,0	0,218	0,224	0,241	0,227
2	80	0,05	5,0	0,587	0,596	0,581	0,588
3	46	0,25	5,0	0,35	0,376	0,368	0,365
4	80	0,25	5,0	0,622	0,634	0,641	0,632
5	46	0,05	10	0,476	0,481	0,462	0,473
6	80	0,05	10	0,604	0,619	0,621	0,615
7	46	0,25	10	0,536	0,544	0,534	0,538
8	80	0,25	10	0,662	0,671	0,668	0,667

Стабильность процесса плоского шлифования и сохранения режущей способности обеспечивается при глубине резания до 0,15 мм, что подтверждается оценкой износа абразивного круга. Рис. 7 демонстрирует локальное изнашивание периферии полимерной матрицей и перерезанными армирующими волокнами композита. Сохранение пористости режущего инструмента, обеспечивает действие свойства его самозатачивания. Так же стоит отметить, что вышеуказанные значения глубины обработки, сопровождаются допустимой температурой верхних слоев заготовки.

Как можно отметить, повышение качества поверхностного слоя при визуальном осмотре достигнуто при повышении количества проходов. Первый проход при глубине резания 0,05 мм и скорости подачи стола 5 м/мин позволяет устранить ворсистость крайних слоев заготовки, полученную ранее. Однако ввиду глубины и протяженности трещин в матрице композита, повышение качества

обработанной поверхности требует увеличение количества проходов до полного исключения дефектов. Путем многопроходного движения инструмента достигается точность поверхности IT6-7 (рис. 8)



Рис. 7. Засаливание периферии шлифовального круга 25AF46 K7 V35 2250 при глубине резания $t = 0,05$ мм и $S = 5,0$ м/мин

Fig. 7. Loading of the grinding wheel face 25A F46 K 7V 35 2250 at cutting depth $t = 0,05$ mm and $S = 5,0$ m/min

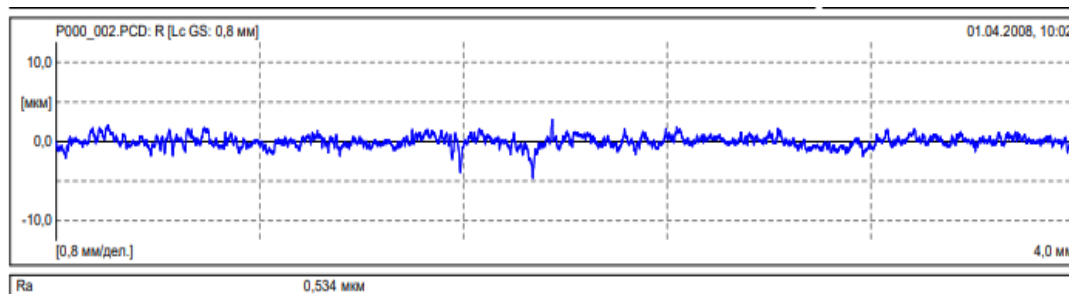


Рис. 8. Профилограмма поверхностного слоя, полученного в результате первого прохода при шлифовании с $S = 5,0$ м/мин и $t = 0,05$ мм

Fig. 8. Profilogram of the surface layer obtained as a result of the first pass during grinding with $S = 5,0$ m/min and $t = 0,05$ mm

Обеспечение хорошего качества поверхностного слоя является следствием высокой пористости и рациональной зернистости шлифовальных кругов. Высокая пористость кругов в совокупности с зернистостью позволяют сохранять режущую способность периферии круга и тем самым обеспечивать способность самозатачиваться в процессе резания (рис. 9).

По результатам экспериментальных исследований, представленным в табл. 4 – 5, а также матрице планирования полного факторного эксперимента разработаны линейные математические модели зависимости шероховатости поверхностного слоя от режимов лезвийной обработки фрезерованием и абразивной обработки плоским шлифованием (табл. 6).



Рис. 9. Общий вид периферии высокопористого шлифовального круга 25A F46 G14 V35 после обработки образцов из ПКМ при $S = 5,0$ м/мин и $t = 0,05$ мм

Рис. 9. General view of the periphery of a highly porous grinding wheel 25A F46 G14 V35 after processing samples from PCM at $S = 5,0$ m/min and $t = 0,05$ mm

6. Математические модели, устанавливающие влияние режимов обработки на шероховатость поверхностного слоя при последовательной лезвийно-абразивной обработке

6. Mathematical models that establish the effect of processing modes on the roughness of the surface layer during sequential edge-cutting abrasion

Инструмент	Линейная математическая модель
Лезвийная обработка фрезерованием специальной твердосплавной прямозубой концевой фрезой	$Ra = 0,2731 + 0,000132n + 0,003835S + 0,0655t - 0,00000202nS - 0,000078nt - 0,00008St + 0,00000086nSt$
Абразивная обработка шлифовальным высокопористым кругом 25AF45G14V 35 2250	$Ra = -0,9095 + 0,0183F + 2,21t + 0,117S - 0,02536Ft - 0,0014Fs - 0,17tS + 0,00235FtS$

Данные математические модели прошли проверку и получили положительную оценку однородности выборочной дисперсии по критерию Кохрена Gp , значимости выборочных коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента tp и адекватности математической модели по критерию Фишера Fp .

Очень важным этапом экспериментального исследования является сравнительная оценка прочности изделий из ПКМ, обработанных традиционным лезвийным инструментом и изготовленных методом последовательной лезвийно-абразивной обработки с целью установления зависимости влияния дефектов поверхностного слоя при механической обработке на снижения прочности изделий из ПКМ. Испытания проводились на

универсальной разрывной электромеханической машине Instron 5965 путем последовательного нагружения образца на растяжение до 70 Кн и записи линейного удлинения. В качестве заготовок приняты четыре образца, обработанных по новой технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки (№ 1 – 4), а также четыре образца, обработанных лучшим среди исследованных лезвийным инструментом (№ 5 – 8) на рациональных режимах резания согласно математической модели. Автоматически проводилась запись нагрузки и величины растяжения образца при его разрыве. Результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 7. и представлены на графиках записи испытаний на рис. 10

7. Сводные результаты прочностных испытаний ПКМ на растяжение и разрыв

7. Summary results of tensile and tensile strength tests

Последовательная лезвийно-абразивная обработка			Лезвийная обработка фрезерованием		
№ образца	Сила растяжения, кН	Перемещение до разрыва, мм	№ образца	Сила растяжения, кН	Перемещение до разрыва, мм
1	64	8,84	5	42	6,65
2	49	7,95	6	36	6,28
3	48	7,92	7	48	7,32
4	50	8,1	8	42	6,61
Среднее значение	52,7	8,2	Среднее значение	42	6,65

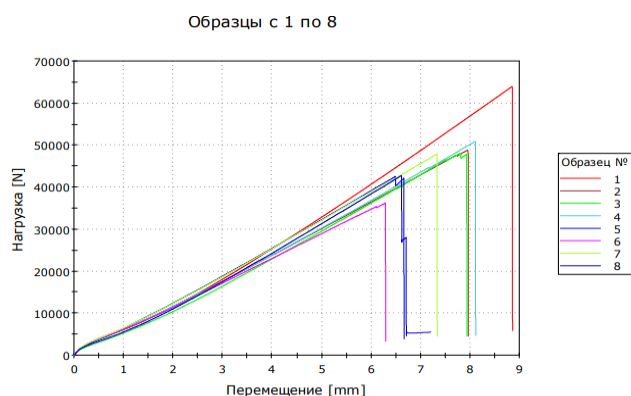


Рис. 10. Графики испытаний на растяжение и разрыв образцов из ПКМ, обработанных по новой технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки (№ 1 – 4) и обработанных фрезерованием

Fig. 10. Plots of tensile and rupture tests of samples from PCM treated according to the new technology of sequential blade-abrasive processing (No. 1 – 4) and processed by milling

В результате анализа полученных данных установлено, что применения последовательной комбинированной лезвийно-абразивной обработки приводит к повышению прочности ПКМ на разрыв и разрушение в среднем на 25 % по сравнению с лезвийной обработкой фрезерованием за счет снижения величины дефектов в поверхностном слое в виде трещин, разрывов и деламинации крайних слоев обработанной заготовки. На основании этих результатов можно утверждать, что и сопротивление усталости при знакопеременных нагрузках изделий из ПКМ также существенно повысится, что является весьма важным фактором для повышения надежности и долговечности работы изделий авиационной и ракетно-космической техники.

Выводы

1. На основании проведенных исследований впервые установлено, что применение новой

технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ приводит к существенному снижению величины дефектов в поверхностном слое в виде трещин, разрывов и деламинации крайних слоев обработанной заготовки, что обеспечивает гарантированное повышение прочности на разрыв и разрушение изделий на 20...25 % по сравнению применяемой на практике обычной лезвийной обработкой фрезерованием.

2. Новая технология последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ может быть реализована при соблюдении следующих требований:

- в качестве предварительного лезвийного режущего инструмента необходимо применение твердосплавной прямозубой фрезы с целью снижения величины деламинации крайних слоев заготовки;

- режимы предварительной лезвийной обработки должны быть определены с учетом требований конструкторской документации и производительности производственного процесса. Рекомендуются следующие режимы резания при фрезеровании: скорость резания 65...70 м/мин, подача $S = 65$ мм/мин и глубина резания 1,0 мм;

- для окончательной операции финишной обработки и устранения ранее образованных дефектов поверхностного слоя в ПКМ рекомендуется применение высокопористых шлифовальных кругов с зернистости не выше F60. Рекомендуется следующая характеристика шлифовального круга 25A F46 G14 V35 2250;

- в зависимости от требований по величине и площади дефектов обработанной поверхности рекомендуется варьирование количества проходов при финишной обработке при соблюдении режимов резания: скорость подачи стола 5,0 м/мин и глубина шлифования $t = 0,05$ мм;

– контроль шероховатости поверхности проводить в совокупности с визуальным осмотром при помощи цифрового микроскопа с целью определения величины и площади дефектов на обработанной поверхности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Макаров В.Ф.** Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетнокосмической техники // Вестник ПНИПУ. 2015. Т. 17. № 2. С. 30–41.
2. **Ярославцев В.М.** Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
3. **Ярославцев В.М.** Обработка резанием полимерных композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 180 с.
4. **Механическая** обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов. Сумы: Изд-во ИТД. «Университетская книга», 2013. 97 с.
5. **Козулько Н.В.** Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 2. С. 179–189.
6. **Дударев А.С.** Конструкции алмазного инструмента для сверления и фрезерования полимерных композиционных материалов. СТИН. 2013. № 6. С. 9–15.
7. **Макаров В.Ф., Волковский А.А., Сабирзянов А.И.** Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2020. № 9. С. 40–48.
8. **Волковский А.А., Макаров В.Ф.** Оценка качества обработанной поверхности при плоском шлифовании ПКМ // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. Т. 25, № 1. С. 73–82.
9. **Волковский А.А., Макаров В.Ф.** Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 2. С. 15–25.

10. **Volkovskiy A.A., Makarov V.F.** The study of grinding polymer composite material // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Челябинск, 2022. С. 548–555.

REFERENCES

1. Makarov V.F. Investigation of the problems of machining operation of modern high-strength composite materials used for the aircraft engineering and rocket and space equipment production of parts // Bulletin of PNRPU, 2015, vol. 17, No. 2, pp. 30–41.
2. Yaroslavtsev V.M. Highly efficient technologies for machining of products made of composite materials: textbook. Moscow: Moscow: Publ. house of MSTU named after N.E. Bauman, 2012.
3. Yaroslavtsev V.M. Machining of polymer composite materials: textbook. Moscow: Publ. house of MSTU named after N.E. Bauman, 2012. 180 p.
4. Machining of composite materials in the assembly of aircrafts. Sumy: Publishing house ITD "University Book", 2013, 97 p.
5. Kozulko N.V. Abrasive processing mechanization of parts from polymeric composite materials for paste operation. Vestnik of Don State Technical University. 2018;18(2):179–189.
6. .Dudarev A.S. Diamond tool designs for drilling and milling polymer composite materials. STIN, 2013, No. 6, pp. 9–15.
7. Makarov V.F., Volkovsky A.A., Sabirzyanov A.I. Increase of productivity and composite abrasion quality based on choice and abrasive tool rational use // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No. 9, pp. 40–48.
8. Volkovsky A.A., Makarov V.F. Comparative quality analysis for treated surface in flat grinding of polymer composite materials. // Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering. Materials science. – 2023, vol. 25, No. 1. pp. 73–82.
9. Volkovsky A.A., Makarov V.F. Comparative quality analysis for treated surface in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials based on carbon fiber. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 15–25.
10. Volkovskiy A.A., Makarov V.F. The study of grinding polymer composite material // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk, 2022, pp. 548–555.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.07.2023; одобрена после рецензирования 21.07.2023; принята к публикации 25.07.2023.

The article was submitted 11.07.2023; approved after reviewing 21.07.2023; accepted for publication 25.07.2023.