

Научные технологии в машиностроении. 2023. №2 (140). С. 15-25.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №2 (140). P. 15-25.

Научная статья
УДК 621.923.9
doi:10.30987/2223-4608-2023-2-15-25

Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна

Арте́м Алекса́ндрович Волко́вский¹, аспирант,
Влади́мир Фе́дорович Мака́ров², д.т.н.

^{1, 2} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
¹ VolkovskiiWork@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>
² makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. На основе проведенных экспериментальных исследований по сравнительному анализу качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов определены показатели эффективности прерывистого шлифования и определен перечень рекомендаций к применению абразивной обработки ПКМ.

Ключевые слова: прерывистое шлифование, абразивная обработка ПКМ, шлифование, температура при шлифовании, шероховатость поверхности, деламация, засаливание, режимы резания

Для цитирования: Волковский А.А. Макаров В.Ф. Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 2 (140). – С. 15-25. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-15-25.

Original article

Comparative quality analysis for treated surface in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials based on carbon fiber

Artem A. Volkovsky¹, postgraduate student,
Vladimir F. Makarov², Dr.Sc.Tech.

^{1, 2} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
¹ VolkovskiiWork@mail.ru, ² makarovv@pstu.ru

Abstract. Based on the conducted experimental studies regarding the comparative quality analysis for treated surfaces in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials, the abrupt grinding performance criteria were determined and an advice list for abrasive processing of PCM was also made.

Keywords: abrupt grinding, abrasive processing of PCM, grinding, grinding temperature, surface roughness, delamination, blunting, cutting modes

For citation: 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. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-15-25.

Введение

Современное машиностроение на сегодняшний день находится на этапе переоценки путей собственного развития, последнее напрямую связано с применением полимерных композиционных материалах (ПКМ) в новых для себя отраслях промышленности [1, 2]. Полимерные композиты благодаря сбалансированности физико-механических свойств получают возможности применения в более нагруженных узлах машин. Таким образом, формируется тенденция на постепенную замену традиционных материалов и сплавов на полимерные композиционные материалы, в основе которых в качестве армирующего элемента выступают высокопрочные стеклянные и угольные волокна [2]. Широкое применение композитов находит авиационная промышленность, где изготавливаются звукопоглощающие панели, элементы корпусов, фюзеляж, носовая часть и крылья инновационного гражданского лайнера МС-21. Производство МС-21 имеет тенденцию на увеличение объемов производства, что обусловлено плановыми показателями годового выпуска до 200 единиц к 2030 г.

Высокие темпы расширения областей применения ПКМ влекут за собой необходимость обеспечения повышенных требований показателей качества изделий, в ряду которых на лидирующих позициях находится качество поверхностного слоя. Последнее, зачастую определяется параметром шероховатости обработанной поверхности, наличием трещин и выровов, что может привести к выходу из строя всех технической системы. В настоящее время, исследованием проблемы повышения и стабилизации качества обработанной поверхности из ПКМ занимается большое число исследователей по всему миру [3 – 6]. В качестве основных решаемых проблем обеспечения качества, выступают такие как ликвидация дефектов – деламинация, ворсистость, термодеструкция и и растрескивание полимерной матрицы композита.

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

Для обеспечения высоких показателей качества определены основные направления исследований, к которым относятся высокоскоростное фрезерование, электроэрозионная об-

работка ПКМ, нанесение вспомогательных покрытий на обрабатываемую поверхность, изменение геометрии режущего инструмента при операциях осевой обработки, гидроабразивная резка и абразивная обработка ПКМ [3 – 6]. Последняя может быть представлена двумя направлениями: обработка гибкими лепестковыми кругами, обработка жесткими абразивными инструментами.

Абразивная обработка гибким инструментом, позволяет обеспечить достаточный уровень показателей шероховатости обработанной поверхности и применяется в технологических процессах, как подготовительная операция под последующую склейку изделий из композитов. В связи с узкой направленностью данной технологии и специфики режущего инструмента, исключается возможность подконтрольного регулирования глубины резания и, как следствие, производительности технологического процесса изготовления изделия.

Таким образом, данная технология не может быть полноценно адаптирована для чистовой обработки торцевых поверхностей звукопоглощающих панелей, корпусов, крыльев и прочих изделий в последующем, сопрягающихся с другими деталями и узлами машины. Обработка жестким абразивным инструментом, позволяет обеспечить наилучшую шероховатость обработанной поверхности Ra 0,4...0,8 мкм и точность IT6, IT7, однако, этот метод является малоисследованным [7 – 9]. При сопоставлении показателей качества, полученных при обработке лезвийным и абразивным инструментом, последний занимает преимущественную позицию.

Улучшение качества обработанной поверхности при шлифовании ПКМ обусловлено тем, что абразивная обработка проводится на высоких скоростях резания порядка 35...50 м/с, что в 10 – 15 раз превосходит обработку лезвийным инструментом. Кроме того, абразивные зерна обладают более высокой твердостью, с обеспечением постоянной острой режущей кромкой. В результате, абразивное зерно перерезает твердое волокно ПКМ, не деформируя, не вытягивая и не ломая его как при лезвийной обработке [8].

Однако операция шлифования вызывает повышенные температуры в зоне обработки, что является негативным фактором при обработке терморезистивных композитов на полимерной основе. По результатам исследований, представленных кафедрой «Инновационные технологии машиностроения» Пермского На-

ционального Исследовательского Политехнического Университета, определено влияние режимов плоского шлифования на температуру в зоне обработки и шероховатость обработанной поверхности. При измерении температуры зафиксированы значения до 121 °С, что является неблагоприятным фактором для обработки ПКМ [8]. В качестве решений, для снижения температуры в зоне резания, предложено применение методики прерывистого шлифования, представленного профессором А.В. Якимовым [10]. Применение прерывистого шлифования обеспечивает снижение температуры в зоне обработки и стабилизация показателей параметра качества обработанной поверхности. Методика прерывистого шлифования, ранее имела экспериментальное и теоретическое обоснование только при обработке металлов, что гово-

рит о разнородности процессов при обработке ПКМ, в связи с чем реализованы экспериментальные исследования.

Методика проведения экспериментального исследования

В основу экспериментальных исследований заложен сравнительный анализ температуры резания и качества обработанной поверхности при традиционном и прерывистом плоском шлифовании ПКМ.

В качестве исследуемых параметров принимались температура поверхностных слоев T , °С в процессе обработки и шероховатость поверхности Ra , мкм. Экспериментальные исследования реализованы согласно методике планирования полного факторного эксперимента 2^2 (табл. 1).

1. Средства технического оснащения экспериментального исследования

Оборудование и СТО	Наименование	Назначение
Плоскошлифовальный станок	JETJPSG 1224H	Обеспечение механической обработки абразивным инструментом
Режущий инструмент 300 x 76 x 40 мм	25A F60 K 7 V 35 2250 64C F60 K 7 V35 2250	
Пирометр	Bosch UniversalTemp	Измерение температуры в верхних слоях заготовки
Профилометр	MarSurf PS10	Оценка качества обработанной поверхности по параметру шероховатости Ra , мкм
Диагностический стенд Камертон РОС	Камертон РОС	Оценка динамических изменений виброускорений технической системы

Выбор параметров исследования обосновывается физико-механическими свойствами связующего материала композита, который представляет собой эпоксидную смолу. Последняя, относится к классу термореактивных полимеров, поэтому необходимо вести кон-

троль 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.



а)



б)

Рис. 1. Экспериментальная установка:

а – общий вид проведения исследований; б – зона обработки

Шлифовальный круг для прерывистого шлифования изготовлен согласно методике расчета прерывистого профиля шлифовального

круга, предложенной А.В. Якимовым [10]:

1. Определение полуширины теплового источника h (для плоского круга):

$$h = 0,5\sqrt{dt}, \quad (1)$$

где d – диаметр инструмента, м; t – глубина резания, м.

2. Определение безразмерного параметра скорости:

$$u = \frac{v_d \cdot h}{a}, \quad (2)$$

где v_d – скорость подачи детали, (для подачи стола со скоростью 5 м/мин, 10 м/мин, 15 м/мин равны соответственно 0,083 м/с, 0,166 м/с, 0,249 м/с); a – температуропроводность материала, для ПКМ на основе углеволокна $2,165 \cdot 10^{-4}$, м²/с.

3. Вычисление критерия Фурье:

$$F_{\theta 1} = \frac{v - v_0}{A + B \cdot u}, \quad (3)$$

где A, B, v_0 – постоянные величины, характеризующие степень понижения температуры в зоне обработки; v – отношение длины паза к

длине сегмента режущей части.

4. Определение длин:

длина режущей части сегмента (мм):

$$l_1 = \frac{h^2 v_{кр} F_{\theta 1}}{a}, \quad (4)$$

где $v_{кр}$ – скорость резания м/с; длина впадин (мм):

$$l_2 = l_1 \cdot v. \quad (5)$$

5. Определение количеств сегментов режущих частей

$$Z = \frac{\pi \cdot d_{кр}}{l_1 + l_2} \quad (6)$$

где $d_{кр}$ – диаметр круга, мм.

Результаты расчета параметров прерывистого шлифовального круга согласно рекомендуемым коэффициентам понижения температуры представлены в табл. 2.

2. Результаты расчета профиля прерывистого круга размерами 300 x 76 x 40 мм

Инструмент №	Шлифовальный круг наружным диаметром 300 мм			
	Степень понижения температуры	Длина вершин сегментов l_1 , мм	Длина впадин сегментов l_2 , мм	Количество сегментов Z
1	0,8	336,4	134,6	2
2	0,7	95,1	61,9	6
3	0,6	37,4	29,9	14

По результатам расчетов разработаны шаблоны профиля, согласно коэффициенту понижения температуры равному 0,7. Схема шаблона представлена на рис. 2. Данный коэффициент принят на основании ранее полученных значений температуры в зоне резания и обеспечения максимальной производительности заготовительного производства на этапе подготовки режущего инструмента.

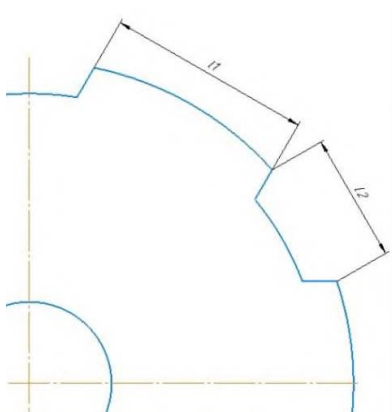


Рис. 2. Размерная схема режущих сегментов

Изготовление прерывистого профиля кругов производилось по шаблону с учетом пово-

рота делительного стола до формирования законченного сегмента. Фотографии изготовленных прерывистых шлифовальных кругов представлены на рис. 3.

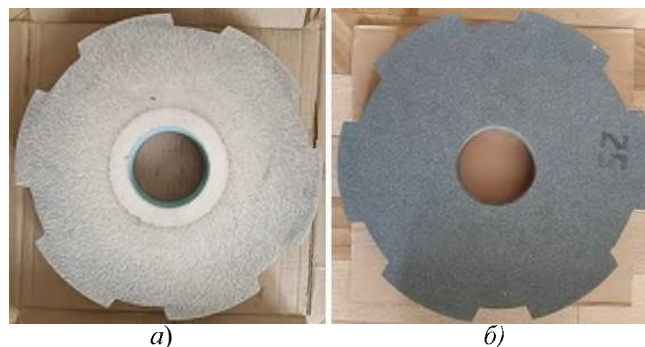


Рис. 3. Профиль прерывистых шлифовальных кругов:
а – 25А F60 K7 V35 2250; б – 64CF60K7V35 2250

Результат исследований

Обработанная поверхность, как было представлено в предыдущих работах, не включает в себе дефектов поверхностного слоя таких как деламинация, термодеструкция и растрескивание матрицы композита [7, 8]. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 3.

3. Результаты экспериментальных исследований

Материал инструмента	Зернистость F	Скорость резания v , м/мин	Глубина резания t , мм	Шероховатость поверхности Ra , мкм				Температура резания T , °C			$T_{ср}$		
				$Ra_{ср}$									
64С	60	5	0,05	0,312	0,376	0,403	0,363	37,2	42,6	41,7	40,5		
			0,1	0,425	0,437	0,476	0,446	40,1	37,0	39,4	38,8		
			0,15	0,371	0,373	0,367	0,370	41,1	43,3	47,5	43,9		
			0,2	1,346	1,796	1,671	1,604	50,6	46,7	60,3	52,5		
			0,25	0,692	0,697	0,780	0,723	49,4	49,2	46,3	48,3		
		10	0,05	0,519	0,544	0,515	0,526	41,8	40,9	40,3	41		
			0,1	0,644	0,693	0,600	0,646	38,2	36,1	43,3	39,2		
			0,15	0,530	0,481	0,618	0,543	46,4	47,2	43,5	45,7		
			0,2	0,638	0,711	0,745	0,698	60,9	54,3	55,2	56,8		
			0,25	0,894	0,910	0,871	0,892	61,8	63,9	64,2	63,3		
		60 Прерывистый круг	5	0,05	1,017	0,988	1,031	1,012	31,6	34,4	33,3	33,1	
				0,1	0,756	0,801	0,852	0,803	38,7	38,5	39,8	39	
	0,15			1,281	1,108	1,117	1,169	49,3	50,7	49,9	49,9		
	0,2			0,814	0,808	0,960	0,861	47,8	47,2	47,1	47,4		
	0,25			0,974	0,990	0,993	0,986	53,9	55,9	55,7	55,2		
	10		0,05	1,208	1,178	1,195	1,194	34,2	35,3	35,7	35,1		
			0,1	1,289	1,304	1,261	1,285	38,6	40,0	40,8	39,8		
			0,15	0,970	0,955	1,013	0,979	43,6	50,9	49,7	48,1		
			0,2	0,730	0,756	0,770	0,752	53,7	53,4	52,9	53,3		
			0,25	0,966	1,042	1,002	1,003	65,6	62,4	62,0	63,3		
	25А		60	5	0,05	0,404	0,455	0,444	0,434	43,5	41,6	40,7	41,9
					0,1	0,502	0,560	0,505	0,522	42,6	47,3	48,2	46,0
		0,15			0,786	0,741	0,777	0,768	50,3	49,7	49,4	49,8	
		0,2			0,637	0,667	0,654	0,653	53,9	51,6	52,4	52,6	
0,25		0,916			0,855	0,918	0,896	54,7	56,2	60,1	57		
10		0,05		0,435	0,443	0,469	0,449	40,1	42,6	41,7	41,5		
		0,1		0,614	0,593	0,578	0,595	40,0	46,3	49,3	45,2		
		0,15		0,530	0,560	0,552	0,547	53,3	57,2	53,2	54,6		
		0,2		0,806	0,915	0,878	0,866	52,0	57,2	55,4	54,9		
		0,25		1,113	1,036	1,097	1,082	59,4	64,6	62,7	62,2		
60 Прерывистый круг		5		0,05	0,816	0,639	0,802	0,752	33,9	31,7	31,4	32,3	
				0,1	0,791	0,874	0,817	0,827	38,5	35,2	38,6	37,4	
			0,15	1,236	1,306	1,241	1,261	37,3	41,7	43,2	40,7		
			0,2	0,960	0,891	0,966	0,939	44,8	44,2	43,7	44,2		
			0,25	2,098	1,501	2,112	1,904	50,0	49,8	51,6	50,5		
		10	0,05	0,820	0,896	0,813	0,843	33,1	33,8	35,6	34,2		
			0,1	0,944	0,787	0,933	0,888	40,8	36,3	35,5	37,5		
			0,15	1,406	1,342	1,338	1,362	48,6	46,2	49,0	47,9		
			0,2	1,170	1,117	1,196	1,161	47,8	48,5	47,8	48,0		
			0,25	1,676	1,578	1,603	1,619	48,8	50,2	49,8	49,6		

По результатам, представленным в табл. 3, были построены диаграммы влияния режимов обработки на шероховатость обработанной поверхности и температуру в верхних слоях заготовки (рис. 4, 5).

Качество обработанной поверхности при прерывистом шлифовании имеет более низкие значения относительного шлифования сплошным инструментом, как видно из рис. 4.

Последнее может быть причиной ударных нагрузок ввиду вхождения в зону контакта с заготовкой нового режущего сегмента круга. Так же стоит отметить, что применение прерывистого шлифования позволяет обеспечить снижение температуры в верхних слоях, что демонстрируют результаты, представленные в табл. 3 и на рис. 5.

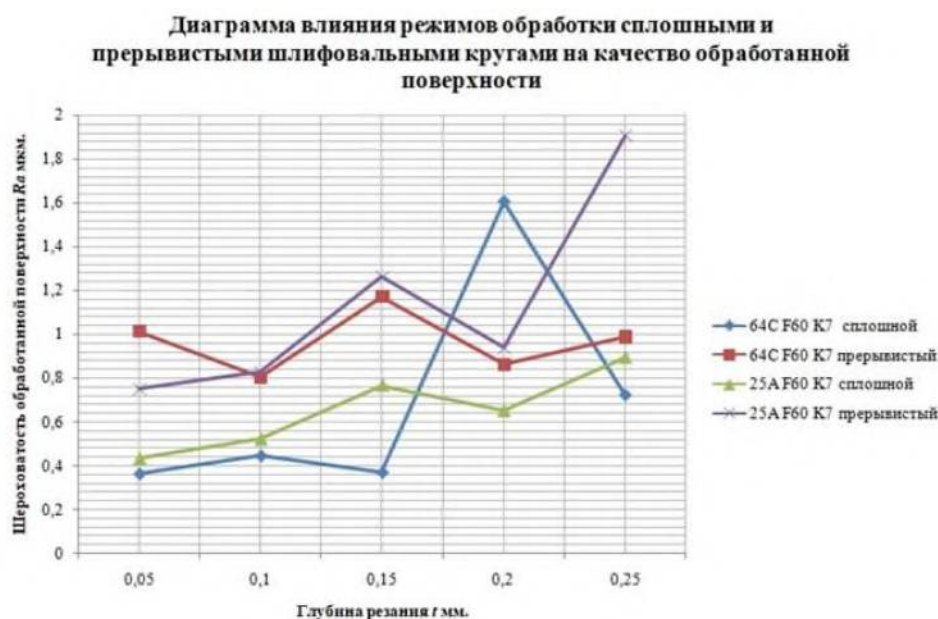


Рис. 4. Влияние режимов обработки сплошными и прерывистыми шлифовальными кругами на качество обработанной поверхности

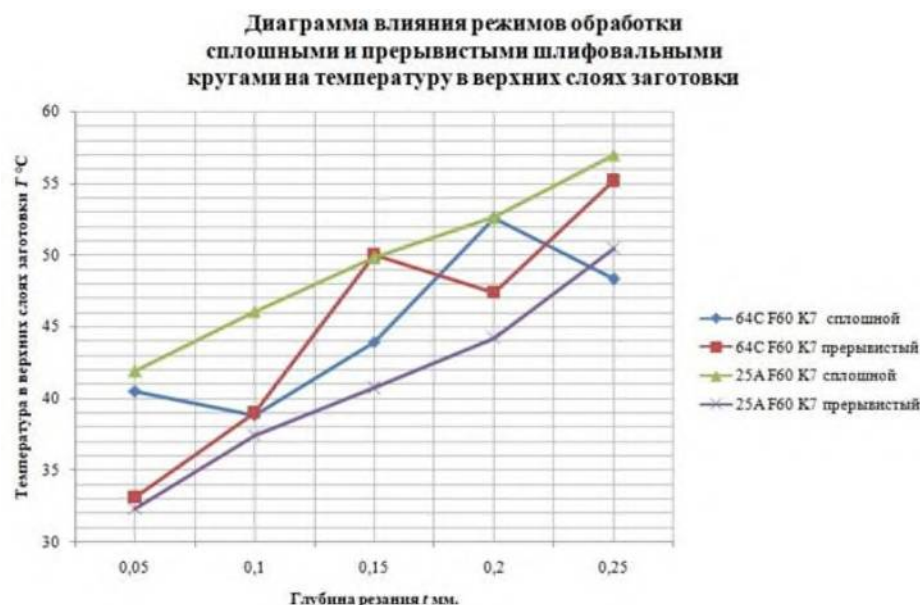


Рис. 5. Влияния режимов обработки сплошными и прерывистыми шлифовальными кругами на температуру в верхних слоях заготовки

Температура в верхних слоях заготовки является параметром, характеризующим качество обработанной поверхности по образованию дефектного слоя. Снижение температуры позволяет повысить эффективность хрупкого разрушения волокон, ввиду снижения засаливания и забивания пор между абразивными зернами шлифовального круга. Как представлено на рис. 5, применение прерывистого шлифования позволяет снизить температуру в верхних слоях заготовки в процессе обработки, что позволяет исключить явление термодеструкции связующего. Однако, стоит учитывать, что принятый коэффициент понижения температуры

равный 0,7 является неадекватным к обработке полимерных композиционных материалов и фактическое понижение температуры заключается в диапазоне от 0,8 до 0,85.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что увеличение глубины резания, стимулирует повышение износа абразивного круга и приводит к полному засаливанию периферии (рис. 6, а). В ранних исследованиях демонстрировалось, что назначение глубины обработки свыше 0,2 мм, влечет за собой повышение температуры в зоне обработки. Последнее, является фактором изменения деформационных процессов в зоне резания, которые

описываются снижением степени хрупкого разрушения и повышением упругих деформаций. При нагреве матрица композита разупрочняется и заполняет поры между абразивными зернами, тем самым снижая режущую способность инструмента. В результате инструмент

выглаживает обрабатываемую поверхность, но не перерезает армирующие волокна, формируя трещины и волнистость в поперечном сечении композита, что ярко выражено на изношенной поверхности круга (рис. 6, б).

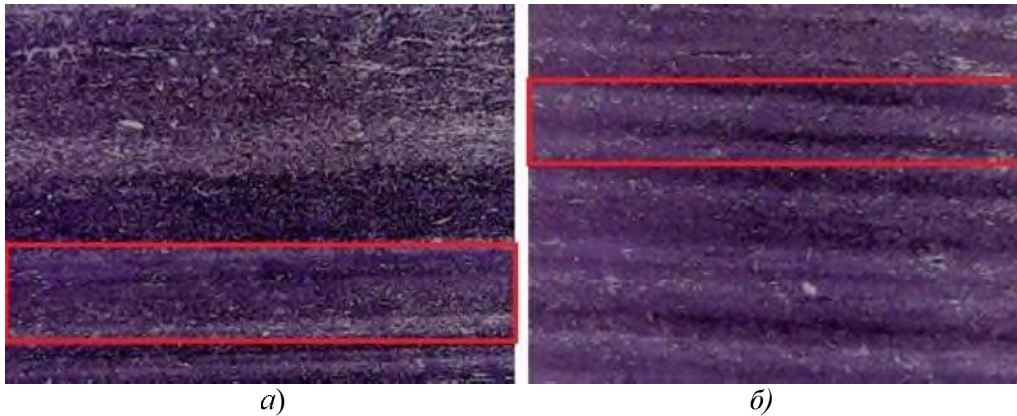


Рис. 6. Засаливание шлифовального круга с образованием борозд от сопротивления армирующих волокон при режимах резания $t = 0,25$ мм и $S = 5$ м/мин:

а – полное засаливание периферии шлифовального круга; б – образование борозд от непрорезанных армирующих волокон

Установлено, что стабильность процесса плоского шлифования и сохранения режущей способности обеспечивается при глубине резания до 0,15 мм, что подтверждается оценкой

износа абразивного круга. На рис. 7 представлено локальное засаливание периферии круга полимерной матрицей и перерезанными армирующими волокнами композита.

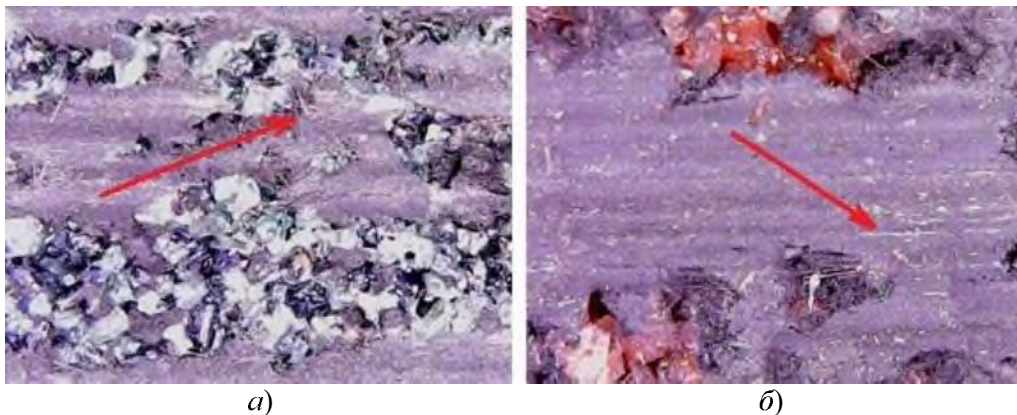


Рис. 7. Износ режущего инструмента при глубине резания $t = 0,05$ мм и $S = 5$ м/мин:

а – 64С F80 К 7 V 35 2250; б – 25А F46 К 8 V 35 2250

Установлено, что значения глубины обработки, сопровождаются допустимой температурой верхних слоев заготовки. Совокупность данных факторов обеспечивает высокое качество обработанной поверхности (см. табл. 4). Однако при сравнительном анализе качества обработанной поверхности и температуры поверхностных слоев заготовки возникают существенные отличительные черты.

Согласно рис. 8, можно утверждать, что прерывистое шлифование при прочих равных условиях влечет повышение качества обработанной поверхности от Ra 0,434 мкм при

сплошном шлифовании до 0,752 мкм при прерывистом на примере обработки шлифовальным кругом 64С F60 К7. Последнее может быть причиной динамических ударных нагрузок, возникающих при входе в зону контакта нового сегмента абразивного круга и заготовки. Таким образом, постоянное ударное воздействие стимулирует переменный характер упругих отжатый системы и, как следствие, нестабильность течения процесса резания. Периферия прерывистого круга, отражающая причины возникновения ударных нагрузок в осевом направлении представлена на рис. 9.

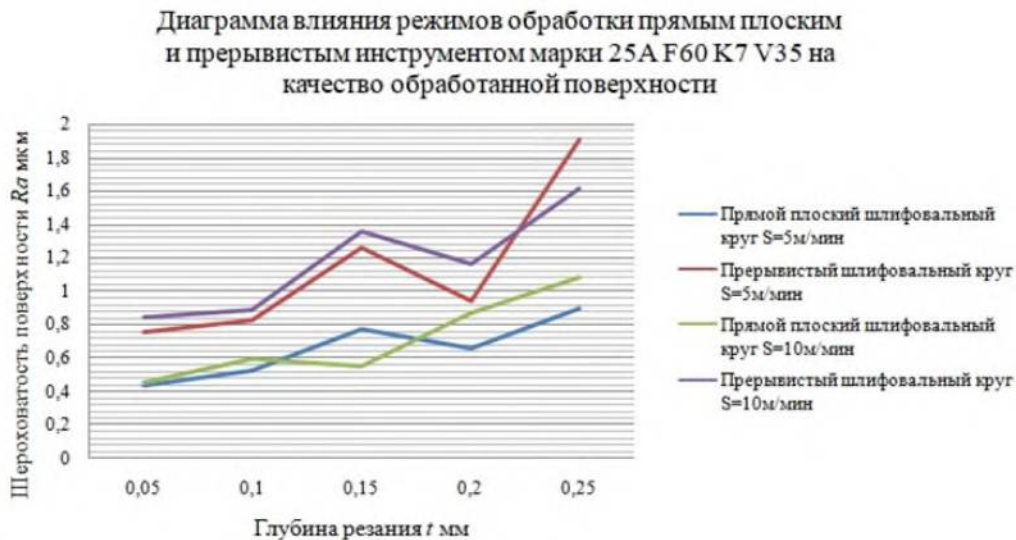


Рис. 8. Влияние режимов обработки прямым плоским и прерывистым шлифовальным кругом марки 64CF60 K7 V35 на качество обработанной поверхности

Согласно рис. 8, можно утверждать, что прерывистое шлифование при прочих равных условиях влечет повышение качества обработанной поверхности от Ra 0,434 мкм при сплошном шлифовании до 0,752 мкм при прерывистом на примере обработки шлифовальным кругом 64С F60 K7. Последнее может быть причиной динамических ударных нагрузок, возникающих при входе в зону контакта нового сегмента абразивного круга и заготовки. Таким образом, постоянное ударное воздействие стимулирует переменный характер упругих отжатий системы и, как следствие, нестабильность течения процесса резания. Периферия прерывистого круга, отражающая причины возникновения ударных нагрузок в осевом направлении представлена на рис. 9.

теплопроводности полимерного композиционного материала на основе углеволокна при эпоксидной связке ниже чем у традиционных металлов и сплавов, коэффициенты указанные в научной литературе не могут быть адекватны к абразивной обработке полимерных композиционных материалов

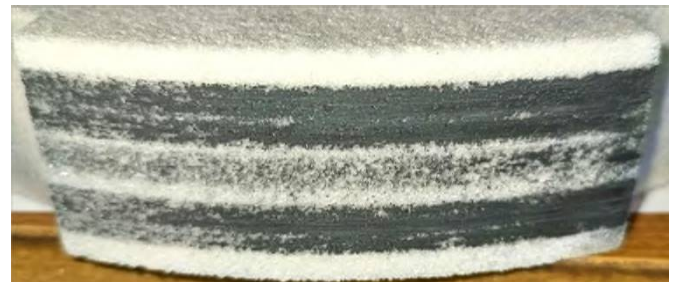


Рис. 9. Периферия прерывистого шлифовального круга марки 25A F60 K7 V35

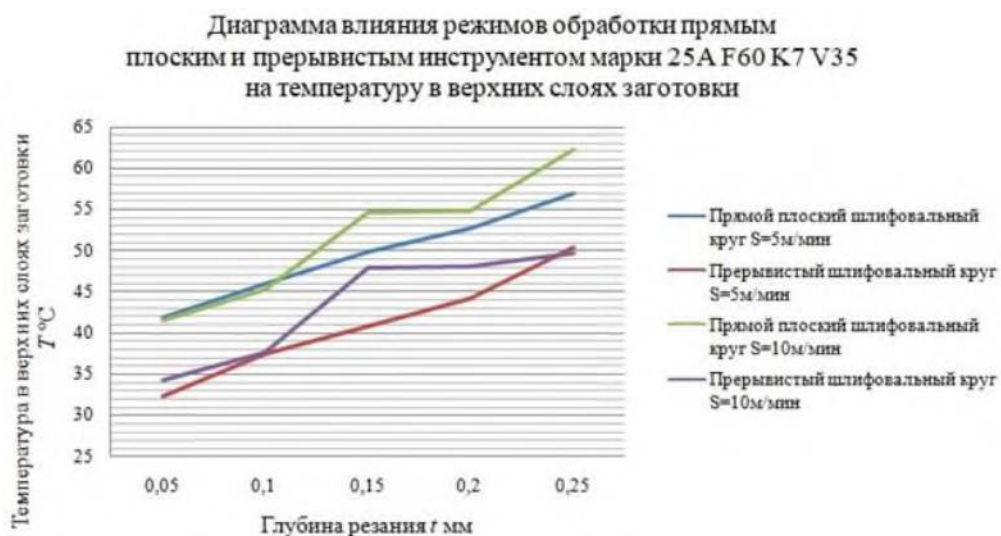


Рис. 10. Влияние режимов обработки прямым плоским и прерывистым шлифовальным кругом марки 25A F60 K7 V35 на температуру в верхних слоях заготовки

На основании результатов представленных в таб. 3 и рис. 10, представляется сводный анализ о характере возникновения температуры в зоне обработки. При низких глубинах обработки и скоростях подачи стола, работа возникающая в зоне контакта сегментов и заготовки имеет наименьшее значение, что объясняется снижением температуры. Однако при увеличении глубины резания и скорости подачи стола, с учетом ударной нагрузки, работа совершаемая системой для удаления материала с обрабатываемой поверхности стремится к увеличению и тем самым стимулирует рост температуры до значений сопоставимых с шлифованием прямым плоским шлифовальным кругом. Увеличение глубины резания повышает объем материала приходящегося на удаление одним сегментом, следовательно, большой объем требует приложения большего усилия и большей площади деформации. Повышение площади деформации повышает температуру внутри заготовки, таким образом, помимо температуры возникающей в результате трения, наибольшее влияние несет именно площадь деформации и среза приходящаяся на один режущий сегмент. При традиционном плоском шлифовании, происходит увеличение температуры в зоне резания в результате засаливания периферии инструмента и потери режущей способности.

Установлено, что прерывистое шлифование, благодаря увеличению и изменению геометрического исполнения режущей части, позволяет избежать сферичности засаливания режущего инструмента, что повышает процент перерезанных армирующих волокон, тем самым формируя более качественную поверхность. При традиционном плоском шлифовании, засаливание периферии инструмента приводит к повышению температуры в зоне обработки и влечет за собой разложение полимера, в свою очередь прерывистое шлифование, несмотря на сопоставимые температуры при высоких режимах обработки, за счет дополнительной торцевой поверхности сегмента принимает характер калибровки поверхности. Вступая в зону резания периферией сегмента, система подвергается сильному упругому отжатию ввиду засаливания режущего инструмента, в то же время засаливание носит обратно пропорциональную зависимость от длины сегмента. По истечению времени контакта сегмента в зону обработки входит незасаленный участок и обеспечивает хрупкое разрушение необработанных поверхностей.

Износ режущего инструмента, имеет

отличительные черты, ввиду неравномерного засаливания рабочей части сегментов. Плоское шлифование традиционным инструментом, при механической обработке шлифованием ПКМ сопровождается равномерным засаливанием инструмента и выходом его из строя и необходимости его правки. При этом прерывистое шлифование включает в себе три зоны износа каждого из сегментов. Первая зона характеризуется равномерным износом участка малой протяженности, где поры между абразивными частицами отсутствуют и заполнены отходами композита. Данная зона не позволяет обеспечить стабильность протекания резания материала. Вторая зона характеризуется снижением засаливания и увеличением размеров пор между частицами, что стимулирует возвращение режущей способности композита. Заключительная зона характеризуется нормализацией режущей способности сегмента. Условные разграничения сегмента прерывистого круга на зоны износа представлены на рис. 11.

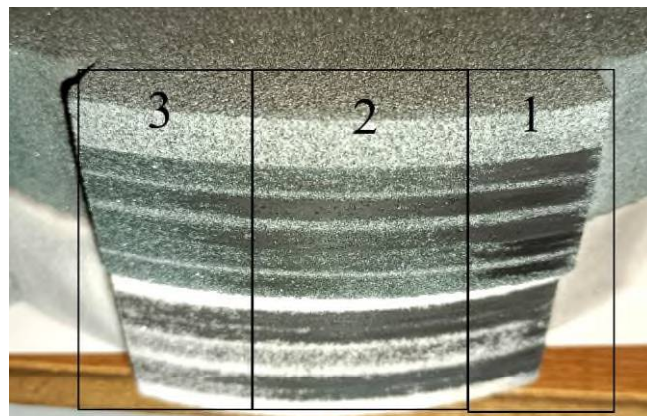


Рис. 11. Зоны износа сегментов прерывистых шлифовальных кругов:
1 – критический износ; 2 – переходная зона износа; 3 – режущая часть

Для повышения производительности процесса прерывистого шлифования необходимо экспериментально разработать методику расчета оптимальных длин сегментов прерывистых кругов, с целью повышения зоны резания и снижения зоны критического износа. Данные исследования позволяют повысить контроль над качеством обработанной поверхности путем снижения ударных нагрузок на заготовку.

С учетом проведения полного факторного эксперимента 2^2 так же были разработаны математические модели описания зависимости параметра шероховатости и температуры верхних слоев заготовки от представленных факторов, для каждого режущего инструмента, принятого для проведения опытов. Полученные зависимости представлены в табл. 4.

4. Математическое описание влияния режимов обработки на температуру верхних слоев заготовки в процессе резания

Инструмент	Линейная математическая модель зависимости шероховатости поверхности Ra , мкм при традиционном плоском шлифовании	Линейная математическая модель зависимости температуры верхних слоев T , °C при традиционном плоском шлифовании
25A F60 K 7 V 35 2250	$Ra = 0,106175 + 1,8133t + 0,03307S$	$T = 41,675 - 33,5t - 0,625S + 4,5St$
64C F60 K 7 V35 2250	$Ra = - 0,1458 + 3,4275t + 0,0625S$	$T = 38,104 + 77,18t - 0,5308S + 9,132St$

Выводы

В ходе проведенных исследований определено, что основными положениями по применению прерывистого шлифования являются:

- снижение температуры в верхних слоях заготовки в диапазоне 10...20 %;
- повышение шероховатости обработанной поверхности в 1,5 раза;
- неравномерное засаливание периферии режущего сегмента.

На основании вышесказанного, в качестве рекомендаций к применению абразивной обработки выступают:

- глубина резания не более 0,15 мм и скорость подачи стола 5 м/мин на основании анализа качества обработанной поверхности и температуры в верхних слоях заготовки;
- при проектировании технологического процесса механической обработки ПКМ применение технологии абразивной обработки как прерывистым, так и сплошным инструментом рекомендуется в качестве финишной операции с предварительной лезвийной обработкой.

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. Рубцов С.М. Полимерные волокнистые композиты в конструкции турбовентиляторного авиационного двигателя ПС-90А // Конверсия в машиностроении. 2007. № 3. С. 19–26.

3. Ярославцев В.М. Новые технологии повышения качества поверхностного слоя при резании волокнистых полимерных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия Машиностроение. 2017. № 6. С.15-18.

4. Бондарь Е.В, Марков В.А. Точение стеклопластиков резцами со сменными многогранными пластинами // Обработка металлов

(Технология, оборудование, инструменты). 2009. №2. С.6–10.

5. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Инновационные технологии обработки полимерных композиционных материалов в машиностроении // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 8 (74). С. 36–42.

6. Ярославцев В.М. Совершенствование метода резания с дополнительным технологическим покрытием для чистовой обработки волокнистых композитов. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2016. № 2, С. 196–209.

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 // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 9. С. 40–48

8. 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.

9. Козулько Н.В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 2. С. 179–189.

10. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. Киев-Одесса: Вища-школа, 1986. 176 с.

REFERENCES

1. Makarov V.F. Investigation of the problems of mechanical processing of modern high-strength composite materials used for the production of parts for aviation and rocket and space technology. Bulletin of PNIPIU. 2015, Vol. 17, № 2. PP. 30–41.

2. Rubtsov, S.M. Polymeric fibrous composites in the design of PS-90A turbofan aircraft engine // Conversion in mechanical engineering. 2007, № 3, PP. 19–26.

3. Yaroslavtsev, V.M. New technologies for improving the quality of the surface layer when cutting

fibrous polymer composite materials. Vestnik MGTU im. Bauman. Series Engineering. 2017, № 6, PP.15-18.

4. Bondar E.V., Markov V.A. Turning of fiber-glass with cutters with replaceable polyhedral plates // Processing of metals (Technology, equipment, tools). 2009, №2, PP.6-10.

5. Zubarev, Yu.M., Priemyshev, A.V. Innovative technologies for the processing of polymer composite materials in mechanical engineering // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2017, №. 8 (74), PP. 36-42.

6. Yaroslavtsev V.M. Improvement of the cutting method with an additional technological coating for finishing fiber composites. // Science and education. MSTU im. N.E. Bauman. Electron. magazine. 2016, №2, PP. 196–209.

7. Makarov V.F., Volkovsky A.A., Sabirzyanov A.I. Improving the productivity and quality of pro-

cessing composite materials based on the choice and rational use of abrasive tools / V. F. Makarov, A.A. Volkovsky, A.I. Sabirzyanov // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, № 9, PP.40-48.

8. 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.

9. Kazulko N.V. Mechanization of abrasive processing of parts made of polymer composite materials // Bulletin of the Don State Technical University, 2018, Vol. 18, № 2, PP. 179–189.

10. A.V. Yakimov. Intermittent grinding. / Kyiv-Odessa: - Vishcha-school: 1986, 176p.

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 08.12.2022; одобрена после рецензирования 15.12.2022; принята к публикации 28.12.2022.

The article was submitted 08.12.2022; approved after reviewing 15.12.2022; accepted for publication 28.12.2022.

