

Научная статья

УДК 621.924.93

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120

СПОСОБЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

В.С. Дышенко¹, К.И. Донецкий¹, М.И. Минибаев¹, Т.Р. Абляз², Е.С. Шлыков², В.В. Ширяев²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия; enter@pstu.ru

Аннотация. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все большее применение в различных отраслях промышленности. Вместе с тем необходимы знания по обработке ПКМ. Представлен обзор не только традиционных способов обработки ПКМ (разрезка абразивными кругами с охлаждением и без него, фрезерование на станке с числовым программным управлением), но и нетрадиционных способов, таких как гидроабразивная резка и электроэрозионная обработка. Описаны технологические особенности различных способов обработки ПКМ, представлено сравнение режимов резания и раскрыты их технологические приемы.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, технология электроэрозионной обработки, фрезерование композитов, гидроабразивная резка, резание, абразив, расслоение

Для цитирования: Дышенко В.С., Донецкий К.И., Минибаев М.И., Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Ширяев В.В. Способы механической и электроэрозионной обработки полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.

Scientific article

METHODS OF MECHANICAL AND ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review)

V.S. Dyshenko¹, K.I. Donetskiiy¹, M.I. Minibaev¹, T.R. Ablyaz², E.S. Shlykov², V.V. Shiryaev²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; enter@pstu.ru

Abstract. Polymer composite materials (PCM) are increasingly being used in various industries. At the same time, knowledge of PCM processing is needed in order not to negate these advantages. An overview of traditional PCM processing methods is presented: cutting with abrasive wheels with and without cooling, milling on a numerically controlled machine, as well as such unconventional methods as: abrasive water jet cutting (AWJ) and electrical discharge machining (EDM). Technological features, comparison of cutting modes are described and technological techniques are disclosed.

Keywords: polymer composite materials, electrical discharge machining processing technology, milling of composites, abrasive water jet cutting, cutting, abrasive, delamination

For citation: Dyshenko V.S., Donetskiiy K.I., Minibaev M.I., Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Shiryaev V.V. Methods of mechanical and electrical discharge machining of polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 3 (109), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все большее применение во всех отраслях промышленности во всем мире. Отличительным их преимуществом является то, что материал, изделие и технологию его изготовления создают за один технологический цикл [1–11]. Но даже таким образом полученная деталь из ПКМ нуждается в механической обработке.

Разнообразие ПКМ (угле-, органо-, стеклопластиков и т. п.), применяемых в проектируемых конструкциях [5–8], требует особого подхода при выборе технологии изготовления, конструкций оснастки, инструментов и способов контроля качества готовых изделий.

Одним из сдерживающих факторов использования ПКМ для изготовления перспективных изделий является ограниченность технологических возможностей по их обработке. Сложности механической обработки определяются специфическими физико-механическими свойствами армированных волокном слоистых пластиков. В процессе изготовления отверстий связующее скалывается на кромках отверстий из-за развития высоких температур и неэффективного охлаждения поверхности в зоне обработки, при этом открывается доступ к наполнителю, что приводит к дальнейшему разрушению в открытой части кромки среза, делая зону вокруг отверстия дефектной, а изделие – с ухудшенными эксплуатационными свойствами.

Резка абразивным диском с охлаждением и без него

Разрезание листовых заготовок из композиционных материалов применяют для получения изделий требуемых геометрических размеров, а также для удаления грата по контуру плиты, образованного в процессе формования (рис. 1) [12–18].



Рис. 1. Оборудование для разрезания плит из ПКМ: *a* – отрезной станок с водяным охлаждением; *б* – отрезной станок

Наиболее производительный метод разрезания композиционных материалов – разрезание абразивными кругами (рис. 2).

Разрезание абразивными кругами листовых заготовок из ПКМ позволяет обеспечить точность изготовления изделий с допуском на размер 0,1 мм. Высокой производительности достигают благодаря незначительным временным затратам на вспомогательные операции подготовительных действий перед непосредственным процессом резания по сравнению, например, с изготовлением на фрезерных станках.



Рис. 2. Абразивные корундовый (а) и алмазный (б) круги

Для разрезания можно применять абразивные круги толщиной 1–4 мм из карборунда на вулканитовой и бакелитовой связках. Рекомендуемая частота вращения – в диапазоне от 2500 до 3500 об/мин в зависимости от толщины заготовки и типа ПКМ.

Обработка стекло- и углепластиков сопровождается сильным изнашиванием абразивного круга, которое заключается как в интенсивном изнашивании связки, приводящем к выпадению отдельных зерен, так и в истирании самих зерен. Такое воздействие на абразивный круг обусловлено наличием в ПКМ армирующих волокон. Кроме того, на корундовом круге наблюдается явление наростообразования частицами деструкции полимера, интенсивность которого зависит от охлаждения обычной водой. Однако следует иметь в виду, что применение охлаждения для стеклопластиков недопустимо из-за такого их свойства, как водопоглощение, приводящего к изменению характеристик материала. Для разрезания без охлаждения рекомендуется использовать алмазные отрезные круги (рис. 2, б). Кроме того, применение алмазного отрезного круга для разрезания стеклопластиков демонстрирует увеличение их производительности в несколько раз и стойкости в десятки раз, по сравнению с корундовым кругом, без снижения качества обработки.

Податливость резанию боропластиков, а также гибридных материалов, в состав которых входят борные волокна, значительно меньше по сравнению со стекло- и углепластиками. Твердость борных волокон соизмерима с твердостью абразивного компонента, входящего в состав абразивных кругов. Высокая вязкость материала, сравнительно низкая теплопроводность, повышенная теплоемкость определяют характер его резания и изнашивания круга. Если при резании углепластика происходит деструкция связки зерен и, как следствие, их выпадение при сравнительно малом наростообразовании на круге, то при резании органопластика основной причиной потери кругом режущей способности является интенсивное наростообразование на поверхности зерен и в межзеренном пространстве продуктов деструкции полимера.

Низкая теплопроводность органопластика (уже на расстоянии 0,15–0,20 мм от зоны резания температура материала близка к температуре окружающей среды), а также высокая водостойкость по сравнению с другими композиционными материалами требуют при его резании обильного водяного охлаждения.

Фрезерование ПКМ на станке с числовым программным управлением

Для изготовления изделий из ПКМ со сложной геометрической формой используют фрезерный станок с числовым программным управлением (ЧПУ) (рис. 3). Принимая во внимание специфические свойства композиционных материалов, можно утверждать, что данный вид оборудования позволяет изготовить изделия в пределах устанавливаемого допуска, однако при учете некоторых технологических особенностей обработки.



Рис. 3. Фрезерно-гравировальный станок с числовым программным управлением

Прижим листовых заготовок из ПКМ

Одним из преимуществ ПКМ по сравнению с металлами является их упругость. В то же время данное свойство имеет негативное значение при обработке заготовок из ПКМ. Надежная фиксация заготовки, обеспечивающая минимальное воздействие сил упругих деформаций на процесс механической обработки, является одной из технологических особенностей обработки изделий из ПКМ.

Приспособления, используемые для крепления заготовок из ПКМ, должны отвечать следующим требованиям: обеспечивать плотную и надежную фиксацию заготовки к опорным плоскостям, не допускать колебаний заготовки в зоне резания, придавать жесткость заготовке, способствовать уменьшению влияния упругих деформаций на процесс резания.

Для заготовок, имеющих теоретический контур сечения профиля поверхности, изготавливают специальное приспособление, соответствующее указанным требованиям (рис. 4). Изготавливать такое приспособление целесообразно в том случае, если оно позволяет получить значительный выигрыш в сокращении временных издержек на вспомогательные операции, к которым относятся затраты времени на установку заготовки и снятие готовой детали, что возможно при серийном производстве. Необходимость в изготовлении подобного приспособления также может быть обусловлена невозможностью фиксации заготовки каким-либо иным образом.



Рис. 4. Приспособление для изготовления детали из ПКМ, имеющей сложную форму профиля

Для заготовок в форме листа прижим осуществляют с использованием вакуумной инсталляции, в составные части которой входят вакуумная помпа, вакуумный стол и картон-подложка. Система вакуумной инсталляции представляет собой вакуумный стол, смонтированный на столе станка; в вакуумном столе выполнено отверстие, к которому подсоединяют армированный шланг, который в свою очередь подсоединяют к вакуумной помпе (рис. 5).

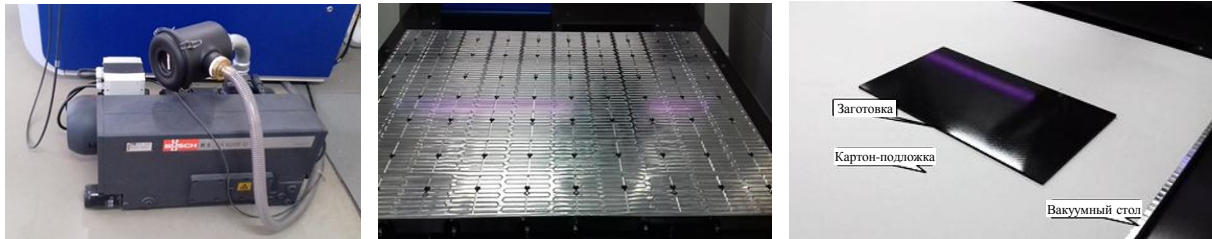


Рис. 5. Вакуумная инсталляция

Усилия, создаваемого вакуумной помпой, достаточно для надежной фиксации заготовки на столе станка, однако при обработке малоразмерной детали этого усилия уже не хватит для ее удержания. На финишном проходе, когда режущий инструмент срезает слой материала, который соединяет деталь с материалом заготовки, прижимного вакуумного усилия в зоне площади этой детали становится недостаточно, поэтому силы резания впоследствии сдвигают ее от первоначального положения. Для решения данной проблемы прибегают к использованию перемычек (рис. 6). Количество и размер перемычек подбирают исходя из соображений надежности нахождения детали в начальном положении и при воздействии на нее сил резания, что в свою очередь зависит как от размера самой детали, так и от ее геометрической формы. Далее перемычку удаляют с помощью шкурки или надфиля.

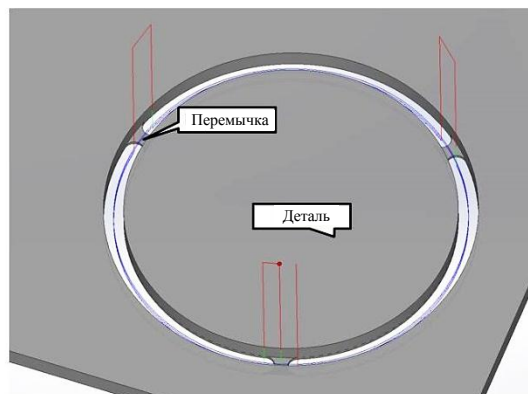


Рис. 6. Деталь с перемычками

В качестве приспособления для прижима листовой заготовки могут быть использованы прихваты. Однако в этом способе крепления упругие свойства полимерных слоистых пластиков могут в наибольшей степени негативно сказаться на процессе фрезерования, поскольку усилия сосредоточены только в точках прижима и не распределены по всей площади поверхности прижимаемого листа заготовки. Данный способ крепления лучше применять для листовых заготовок толщиной от 5 мм и более.

Обеспечить вырезание деталей из листовой заготовки, не прибегая к использованию перемычек, возможно при использовании скотча. На подложке гравером

размечаются контуры деталей, затем внутрь приклеивается скотч (главное – не допустить при этом попадание скотча на траекторию резания). Далее поверх скотча укладывают листовую заготовку. Очевидным недостатком данного способа является трудоемкость подготовительных операций. Помимо этого, зазор, образованный толщиной скотча, не обеспечивает плотного прилегания, что приводит к отслаиванию нижнего слоя по контуру обработанной кромки детали.

Инструмент для обработки ПКМ

Режущий инструмент для фрезерования ПКМ изготавливают из материалов, обладающих высокой устойчивостью к абразивному износу. К таким инструментальным материалам наряду с твердыми сплавами относят кубический нитрид бора и поликристаллические алмазы (Poly Crystal Diamond – PCD). Кроме того, для повышения стойкости на твердосплавный инструмент наносят алмазоподобное покрытие. В настоящее время на рынке режущего инструмента представлена целая линейка фрез, разработанных специально для фрезерования композиционных материалов. Они различаются по геометрической конфигурации, направлению спирали, напылению износостойкого покрытия и т. д.

Анизотропия свойств ПКМ, особенности термической восприимчивости и сильное абразивное воздействие обуславливают при их фрезеровании специфический характер износа инструмента. Износ инструмента приводит к отклонению формы по цилиндричности в том случае, когда деталь круглая (рис. 7). [19] Для получения качественного контура изделия обработку выполняют в две операции. Черновую операцию проводят с припуском рашпильной фрезой (рис. 8). Чистовую операцию выполняют фрезой с PCD-пластиной (рис. 9) [20]. Другим вариантом может стать применение жертвенной подложки из податливого резанию материала – в этом случае инструмент погружается в подложку на глубину, компенсирующую износ инструмента.

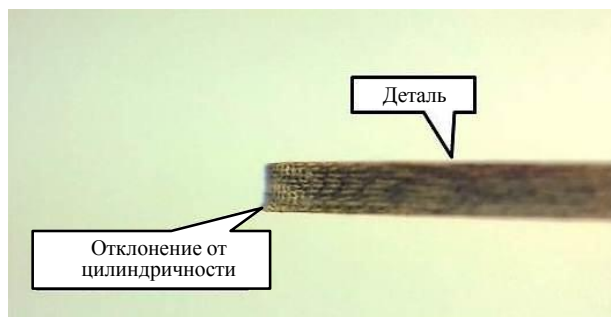


Рис. 7. Отклонение формы детали

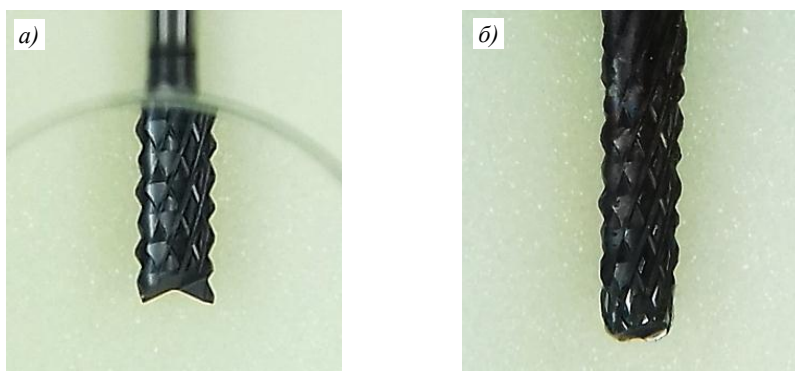


Рис. 8. Рашпильные фрезы: а – новая; б – после обработки ПКМ



Рис. 9. Фреза с поликристаллической алмазной пластиной

В процессе фрезерования истирающее свойство ПКМ воздействует на режущие кромки инструмента, постепенно притупляя их, что приводит к увеличению трения. В результате в зоне резания выделяется большое количество тепла, что в итоге приводит к образованию прижогов на кромках обрабатываемой заготовки. Прижоги также могут быть следствием неправильного назначения режимов резания. Критерием затупления инструмента принято считать образование на кромках явных заусенцев, деламинации, прижогов и других дефектов. Нарботка опыта фрезерования материала конкретного типа и марки позволяет производить смену инструмента до появления дефектов.

Схема армирования наполнителя и состав матрицы полимерных слоистых пластинок определяют процесс отделения срезаемого режущим инструментом материала, от которого в свою очередь зависит отвод тепла из зоны резания, силы резания и, как следствие, точность и качество обработанного контура.

Гидроабразивная резка

Типовая система оборудования гидроабразивной резки (ГАР) изображена на рис. 10. Система состоит из следующих компонентов: несущие опоры, изготовленные из нержавеющей стали; резервуар с водой, имеющий функцию ловушки; быстросъемные опорные ребра, на которые укладывается заготовка; портал для перемещения режущей головки по осям X и Y ; вертикальная подача по оси Z (в некоторых моделях предусмотрены круговое вращение и наклон режущей головки); насос высокого давления; блок управления с программным обеспечением [21].



Рис. 10. Станок гидроабразивной резки

Процесс создания абразивной струи высокого давления является сложным гидродинамическим процессом и заключается в следующем. Насос высокого давления сжимает воду, которая подается в сопло. Затем водная струя, попадая в смесительную камеру, захватывает поступающий туда же из дозирующего устройства абразивный порошок. Далее гидроабразивная суспензия нагнетается в смесительное сопло диаметром ~ 1 мм и выстреливает из отверстия дюзы со скоростью $\sim (900-1200)$ м/с. Диафрагма дюзы выполнена из рубина, сапфира или алмаза (рис. 11). Какие-либо дефекты на режущей головке недопустимы, в противном случае головка не выработает положенный ресурс или мгновенно выйдет из строя. Немаловажным фактором является фильтрация воды, поскольку это также влияет на ресурс режущей головки и всей системы оборудования в целом.



Рис. 11. Дюза с диафрагмой из рубина

Высокоскоростная гидроабразивная струя является универсальным режущим инструментом и может быть применена для резки ПКМ. В работе [22] представлено исследование гидроабразивного резания углепластика толщиной 2, 4 и 8 мм при режимах давления 200 и 400 МПа. За критерий оценки принят такой дефект, как максимальная длина трещины, образовавшейся при резании при давлении 200 и 400 МПа (рис. 12).

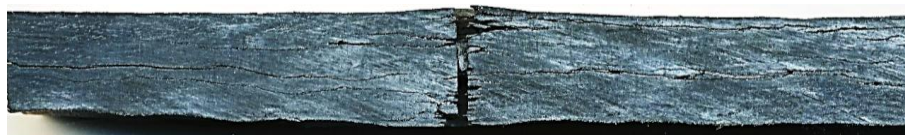


Рис. 12. Пример образования трещины после пробоя на станке гидроабразивной резки в образце углепластика толщиной 8 мм при давлении 400 МПа

Замечен также факт попадания зерен абразива в трещины образцов (рис. 13). Поэтому при применении ГАР для получения готового изделия следует обратить внимание на данную проблему, которая может привести к ухудшению физико-механических свойств, таких как трещиностойкость, прочность, и, следовательно, к снижению эксплуатационных характеристик изделия по таким показателям, как надежность и долговечность.

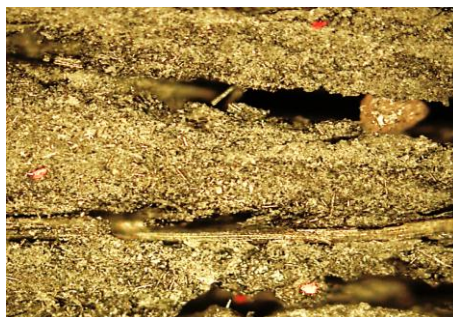


Рис. 13. Пример проникновения зерен абразива в трещины углепластика

Анализ полученных результатов измерений длин трещин свидетельствует о том, что давление 200 МПа является более предпочтительным (см. таблицу).

Максимальные длины трещин образцов углепластика различной толщины при разных режимах давления, образовавшихся при резании

Сторона нахождения трещин максимальной длины	Значение длины трещины, мм, образцов толщиной, мм					
	2	4	8	2	4	8
	при давлении, МПа					
	200			400		
Слева	3,5	6	24	4	13	36
Справа	7	11	36	8	22	35

Кроме того, при давлении 400 МПа наблюдалось большее (по сравнению с режимом резки при давлении 200 МПа) проникновение зерен абразива в образующиеся трещины углепластика.

Гидроабразивная резка полимерных армированных пластиков имеет следующие преимущества:

- отсутствие зоны теплового воздействия;
- отсутствие заусенцев и разлащивания ткани;
- возможность резки термочувствительных материалов;
- отсутствие механического режущего инструмента, кромки которого непрерывно изнашиваются;
- снижение отходов материала (количества стружки);
- небольшая ширина пропила, обеспечивающая плотное размещение и оптимальное использование материала;
- отсутствие запыленности рабочего места;
- экологичность процесса резания (отсутствие углеродной пыли);
- возможность обработки различных типов материала;
- возможность изготовления изделия фигурного профиля.

Электроэрозионная обработка

Еще одним способом, позволяющим проводить качественную обработку ПКМ, является электроэрозионная обработка (ЭЭО) [23–27]. Согласно ГОСТ 25331–82, данная технология заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под действием электрических разрядов в результате электрической эрозии. Выходные данные процесса ЭЭО напрямую зависят от режимов обработки, физико-механических свойств обрабатываемого материала и электрода-инструмента (ЭИ), а также от площади обрабатываемой поверхности.

В настоящее время технологию ЭЭО можно применять для обработки материалов с ограниченной токопроводностью, в том числе для ПКМ. Международный опыт использования ЭЭО свидетельствует о возможностях обработки композиционных материалов, однако обоснованные научные и технологические данные, позволяющие прогнозировать показатели качества обработанной поверхности ПКМ и показатели производительности обработки, практически отсутствуют. Отсутствуют также и технологические рекомендации для обработки нового поколения ПКМ российского производства методом ЭЭО. Не в полной мере изучено изменение структуры обработанной поверхности ПКМ при воздействии единичного импульса в процессе данной технологии.

Объектом исследования при ЭЭО ПКМ является изготовленный методом автоклавного формования конструкционный углепластик марки ВКУ-29 на основе

равнопрочной углеродной ткани фирмы Porcher с поверхностной плотностью 200 ± 10 г/м² и связующего марки ВСЭ-1212, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Согласно работе [28] углепластик марки ВКУ-29 рекомендуется при изготовлении деталей и изделий гражданской авиационной техники, в том числе деталей силовых конструкций планера, таких как крыло, центроплан, элементы механизации и звукопоглощающие конструкции двигателя. Такой ПКМ может эксплуатироваться в диапазоне температур от -60 до $+120$ °С с кратковременным забросом температуры до 150 °С. Уровень сохранения его свойств при максимальной рабочей температуре 120 °С достаточно высокий и составляет по пределам прочности при растяжении 89 %, при сжатии 82 %, при изгибе 71 % [19, 20].

В работе представлено исследование процесса обрабатываемости углепластика ВКУ-29 тремя видами ЭИ, обладающими различными составом и физико-механическими свойствами.

Экспериментальные исследования проводили в лаборатории ЭЭО на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Для проведения исследований использовали копировально-прошивной электроэрозионный станок Electronica Smart CNC. В качестве рабочей жидкости выбрали трансформаторное масло марки И-20А. Процесс ЭЭО производили на трех режимах: *max*, *med* и *min* при силе тока 8 , 2 и $0,5$ А соответственно; параметр продолжительности действия импульса (150 мкс) и напряжение (100 В) оставались постоянными. Выбраны ЭИ трех видов: первый выполнен из графита марки ЭГ (по ГОСТ 4426–80); второй – из композиционных материалов типа псевдосплава системы «медь + коллоидный графит», а в качестве основы использовали порошки меди ПМС-1 (по ГОСТ 49-60–75) и сухого коллоидного графита марки С-1 (по ТУ 113-08-48-63–90); третий – из меди марки М1 (по ГОСТ 1173–2006).

Эксперименты по ЭЭО углепластика марки ВКУ-29 каждым из ЭИ повторяли по три раза. Выявлено, что ЭЭО ПКМ на режиме *max*, вне зависимости от материала ЭИ, сопровождается интенсивным горением материала. Процесс ЭЭО проходит нестабильно. На поверхности образца из ПКМ можно наблюдать наличие прижогов. При данной обработке ПКМ при силе тока 2 и 4 А отмечают стабильное искрообразование, а также отсутствие следов прижогов на обработанной поверхности.

Установлено, что при ЭЭО ПКМ графитовым ЭИ можно наблюдать интенсивное наростообразование на поверхности ЭИ при обработке на всех режимах. На рис. 14 показана поверхность ПКМ после ЭЭО графитовым ЭИ на режиме *med* при силе тока 4 А.



Рис. 14. Поверхность углепластика марки ВКУ-29 после электроэрозионной обработки графитовым электродом-инструментом на режиме *med*

Установлено, что при ЭЭО углепластика ВКУ-29 графитовым ЭИ образуются слои материала, имеющие разорванные участки и волокна, а также выступающие за границы обработанной поверхности. Присутствие таких дефектов является недопустимым

при изготовлении ответственных деталей и изделий из ПКМ. При снижении мощности и режима обработки (переход на режим min) количество дефектов уменьшается не в полной мере.

При ЭЭО ПКМ медным ЭИ можно наблюдать стабильное искрообразование на режимах med и min при силах тока 4 и 2 А соответственно. Обработанная поверхность ПКМ представлена на рис. 15.



Рис. 15. Поверхность углепластика марки ВКУ-29 после электроэрозионной обработки медным электродом-инструментом на режиме med

Снижение количества дефектов на поверхности ПКМ наблюдается после ЭЭО медным ЭИ в сравнении с обработкой графитовым ЭИ. Присутствуют частичные дефекты в виде вырванного волокна ПКМ.

Электроэрозионная обработка ПКМ композитным ЭИ характеризуется высокими показателями качества рельефа на обработанной поверхности (рис. 16).



Рис. 16. Поверхность углепластика марки ВКУ-29 после электроэрозионной обработки композитным электродом-инструментом на режиме med

Показано, что при ЭЭО композитным ЭИ на обработанной поверхности ПКМ практически отсутствуют разорванные слои и ворсистость, кроме того, нет необходимости в дальнейшей чистовой обработке. В результате можно наблюдать эффект «спекания» волокна ПКМ после такой обработки. Электроэрозионная обработка проходила со стабильным искрообразованием без возникновения наростов на рабочих поверхностях ЭИ.

Отсутствие разрывов волокон и ворсистости на поверхности ПКМ позволяет сделать вывод о возможности применения технологии ЭЭО композитным ЭИ изделий из углепластика марки ВКУ-29.

В связи с тем, что в процессе ЭЭО ПКМ возможны разрушение и расслаивание поверхностного слоя, разработан альтернативный способ ЭЭО изделий и деталей из ПКМ через защитный токопроводящий слой – «маску». Выдвинуто предположение о том, что качество и точность обрабатываемых отверстий в ПКМ во время ЭЭО возможно регулировать с помощью дополнительной защиты обрабатываемого материала

сплошным тонким листом-«маской». В качестве «маски» может выступать накладка из токопроводящего материала. «Маска» также может быть с отверстием, ранее созданным аналогично отверстию заданного профиля в обрабатываемом материале.

Проведены эксперименты по обрабатываемости поверхности ПКМ методом ЭЭО с применением специальной «маски» с отверстием и без него.

В случае применения «маски» без отверстия до обработки поверхность ПКМ плотно закрывают сплошным листом – накладкой из токопроводящего и интенсивно теплопроводящего материала. В качестве данных материалов могут выступать кремнистая сталь, алюминий и т. д. толщиной 1–1,5 мм для обеспечения сохранения поверхности с обеих сторон листа в исходном состоянии – без прижогов и деформации, а также для увеличения скорости и производительности обработки (рис. 17).

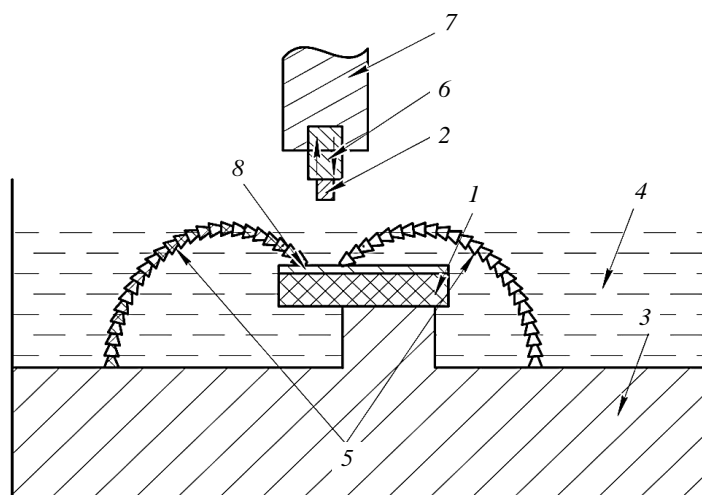


Рис. 17. Электроэрозионная обработка ПКМ с помощью плотно закрепленного на нем сплошного листа-«маски» (1 – ПКМ; 2 – электрод-инструмент; 3 – рабочий стол; 4 – трансформаторное масло; 5 – сопла; 6 – державка; 7 – патрон; 8 – лист-«маска»)

Тонкий лист достаточно легко деформируется, а более толстый требует более длительного времени на обработку. Первоначально получают отверстия в накладываемом листе, затем продолжают ЭЭО прошивкой и задают отверстия уже по шаблону с этим отверстием. В обрабатываемом ПКМ получают заданные параметры отверстия. Электроэрозионная обработка, проводимая с помощью данного метода, позволяет получить поверхности кромок с обеих сторон листа ПКМ без прижогов. Можно также наблюдать бездефектную исходную структуру и минимальную шероховатость на поверхности отверстия (рис. 18).

Установлено, что толщина «маски» в пределах 1–12 мм позволяет ускорить процесс ЭЭО и получить бездефектную поверхность с обеих сторон ПКМ. Становится также возможным повышение качества и точности профилирования обрабатываемого отверстия.

Во втором случае предварительно создают лист-«маску» с отверстием из токопроводящего, теплопроводящего материала толщиной 1–2 мм со сквозными отверстиями в нем и заданным электродом профилем. На лист ПКМ плотно закрепляют полученный тонкий лист-«маску» с отверстием. Электроэрозионную обработку проводят, опуская сначала ЭИ в готовое отверстие, а затем создают сквозное или глухое отверстие на обрабатываемой поверхности листа ПКМ.

Установлена возможность с помощью данного способа получать поверхность изделия с обеих сторон обрабатываемого листа ПКМ в исходном состоянии, края

отверстия – ровными, кромку отверстия – без дефектов (рис. 18) и обеспечивать минимальную шероховатость поверхности ПКМ.

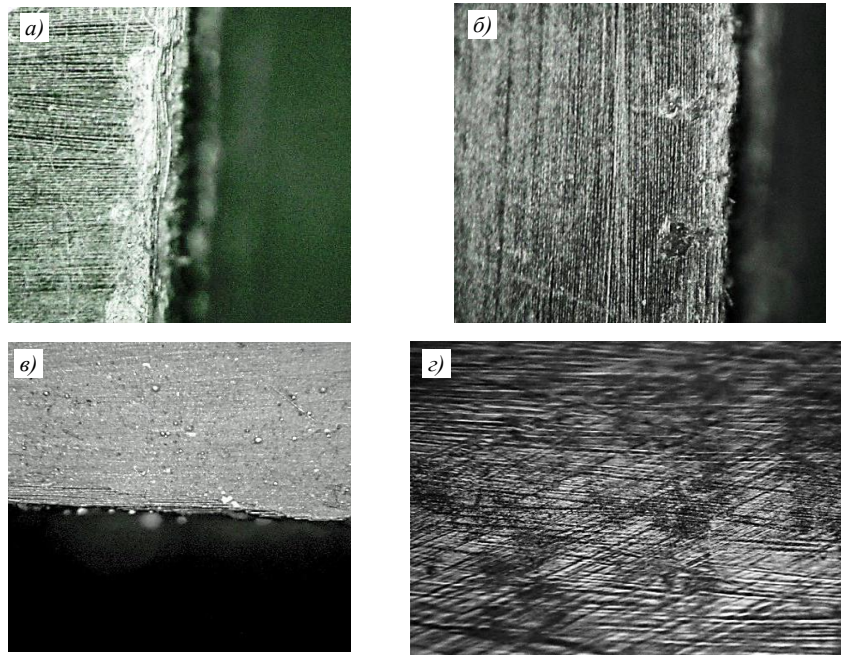


Рис. 18. Поверхности ПКМ после электроэрозионной обработки через «маску» в зоне обработки (кромка) после прошивки отверстия (а, в) и в отверстии (б, г; общий вид)

Данный метод ЭЭО позволяет обеспечить повышенное качество поверхности ПКМ в зоне обработки (без реакции связующего на температуру). Становится возможным наблюдать ровную поверхность отверстия. Отсутствуют структурные и другие нарушения в слоях волокнисто-слоистого ПКМ. Продолжительность процесса ЭЭО зависит от глубины обработки. Время обработки данным методом близко ко времени, которое затрачивается на обработку с использованием сплошной «маски».

Методика наложения токопроводящих слоев (ТС) и «масок» с отверстием и без него позволяет также использовать технологию проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭЭО) для обработки ПКМ (рис. 19).

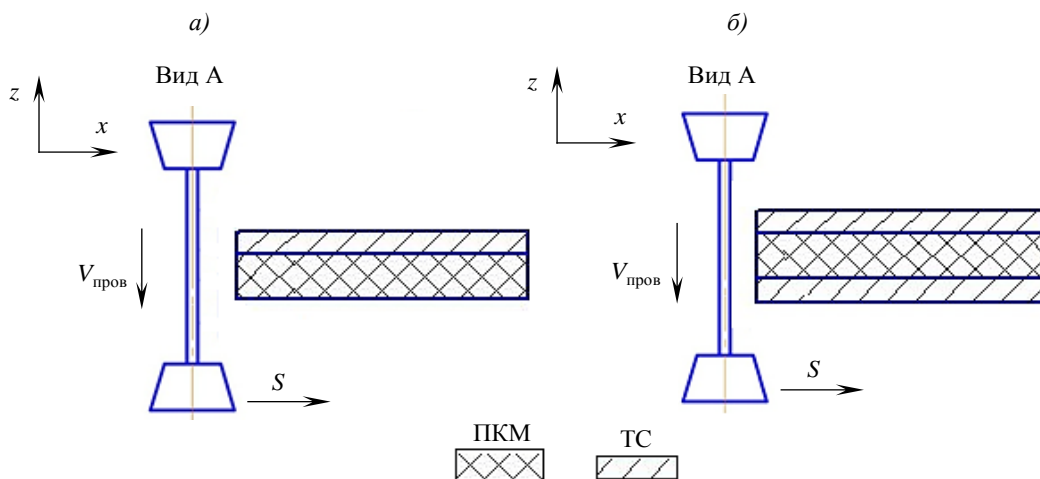


Рис. 19. Схема обработки ПКМ методом проволочно-вырезной электроэрозионной обработки с использованием токопроводящего слоя (ТС) с одной (а) и двух сторон (б) ($V_{\text{пров}}$ – скорость движения проволоки)

Эксперименты по обработке ПКМ методом ПВЭЭО проводили на проволочно-вырезном электроэрозионном станке EcoCut. В качестве ЭИ использовали латунную проволоку Vergocut диаметром 0,25 мм. Рабочей жидкостью являлась дистиллированная вода. Процесс ПВЭЭО проводили на следующем режиме: продолжительность включения и выключения импульса составила 21 и 60 мкс соответственно, напряжение – 50 В, скорость движения проволоки – 1 м/мин.

В результате ПВЭЭО получено два Г-образных реза (рис. 20).

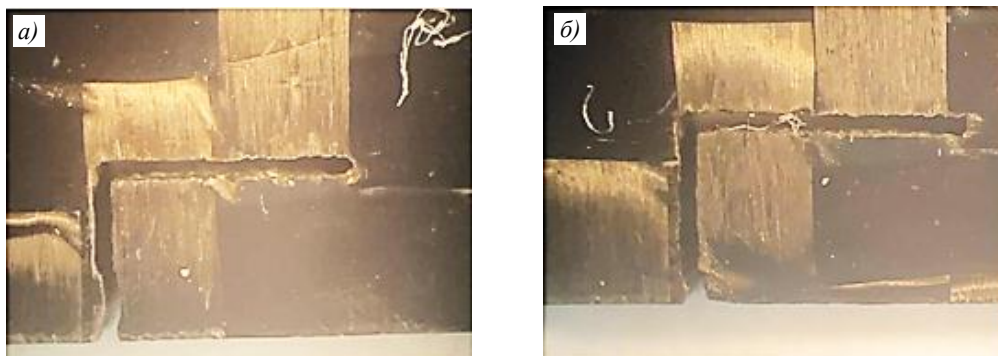


Рис. 20. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка ПКМ с использованием токопроводящего слоя с одной (а) и двух сторон (б)

В процессе ПВЭЭО ПКМ с использованием одностороннего ТС происходит нестабильное искрообразование, а также обрывы ЭИ. Ширину реза измеряли с помощью светового микроскопа Olympus GX51 при увеличении $\times 100$ (рис. 21). Установлено, что при траектории движения ЭИ вдоль волокон ПКМ значение ширины реза нестабильно. Становится возможным наблюдать криволинейные участки в связи с отводом ЭИ от прямолинейной траектории резания. Наибольшее значение ширины реза фиксируют при движении ЭИ в поперечном направлении относительно направления волокон ПКМ.

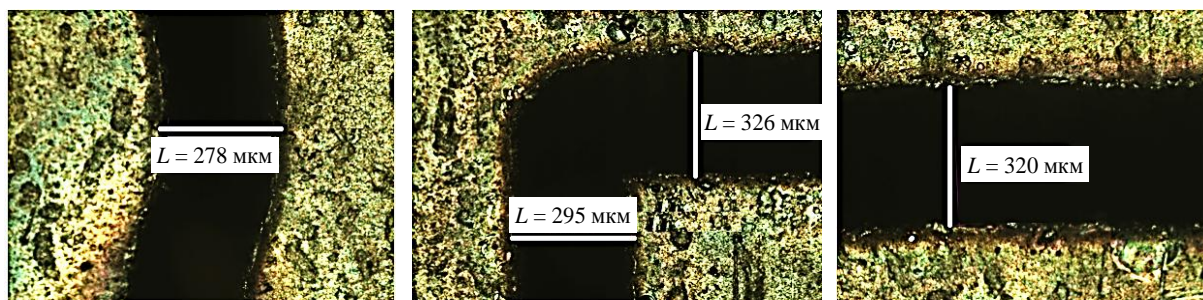


Рис. 21. Ширина реза (L) при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке ПКМ с наложением токопроводящего слоя с одной стороны

При двухстороннем наложении ТС при обработке (рис. 22) процесс ПВЭЭО стабильный, обрывы ЭИ отсутствуют. Значение ширины реза стабильно, не зависит от направления движения ЭИ. Среднее значение ширины реза составляет 289 мкм.

При разработке технологии ПВЭЭО годной заготовки необходимо учитывать величину коррекции траектории резания. Данная коррекция рассчитывается как разность ширины реза и диаметра ЭИ. Правильно подобранная коррекция позволяет обеспечивать заданную точность ПВЭЭО. На основе полученных результатов изготовлен опытный образец изделия типа «шестерня» из ПКМ методом ПВЭЭО с наложением ТС с двух сторон (рис. 23).

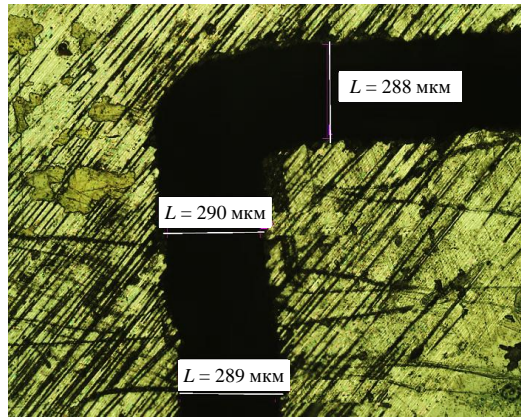


Рис. 22. Ширина реза при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке ПКМ с двухсторонним наложением токопроводящего слоя

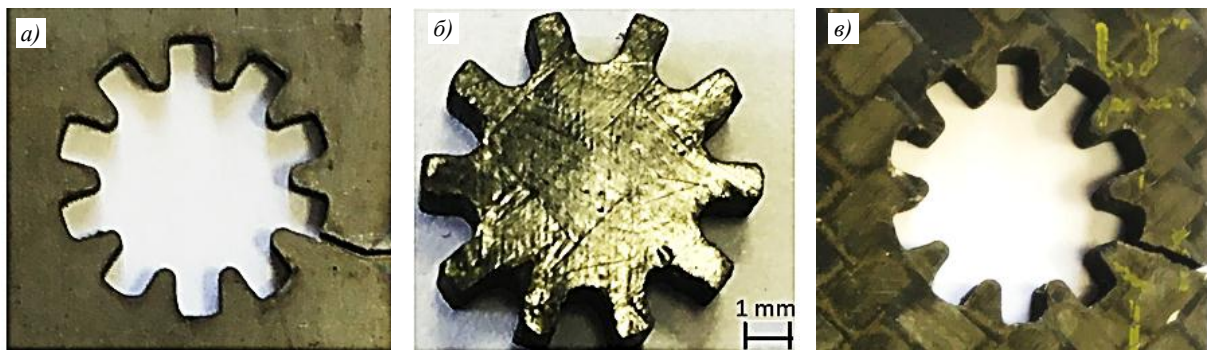


Рис. 23. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка изделия из ПКМ: *а* – токопроводящий слой; *б* – обработанная деталь; *в* – заготовка из ПКМ

Внесенная в управляющую программу величина коррекции траектории движения ЭИ позволяет обеспечить заданные параметры качества и точности изготовления сложнопрофильного мелкогабаритного изделия из ПКМ методом ПВЭЭО.

Заключения

Применение ПКМ в различных отраслях постоянно возрастает благодаря их уникальным свойствам. Вместе с тем важной задачей является предотвращение увеличения негативного воздействия вредных веществ на окружающую среду. Поэтому каждый этап жизненного цикла изделия (производство, эксплуатация, утилизация) должен быть тщательно проработан еще на этапе его проектирования.

В связи с тем, что во время обработки композиционных материалов образуется много пыли, а в результате нагрева из ряда ПКМ выделяются вредные для здоровья персонала летучие вещества, необходимо, чтобы оборудование имело систему отвода и из зоны резания.

Следует также иметь в виду, что при фрезеровании углепластика образуется пылевидная токопроводящая стружка, поэтому для предотвращения выхода из строя оборудования его электрические части должны быть надежно защищены.

Каждый из способов обработки ПКМ имеет свою область применения: резка абразивным диском используется для плоских изделий с прямыми резами, ЭЭО и ГАР – для сложнопрофильных мелкогабаритных изделий, обработка на станках с ЧПУ – для изделий со сложной геометрической формой профиля поверхности.

В ходе экспериментов по ЭЭО:

– установлено отсутствие разрывов волокон и ворсистости на поверхности ПКМ, что позволяет сделать вывод о возможности применения технологии ЭЭО композитным ЭИ изделий из углепластика марки ВКУ-29;

– впервые предложен способ ЭЭО ПКМ с применением сплошного листа-«маски» с отверстием и без него, позволяющий повысить качество обработанной поверхности изделия;

– получена методика, способствующая установлению величины коррекции траектории движения ЭИ и обеспечивающая заданные параметры точности изготовления сложнопрофильного мелкогабаритного изделия из ПКМ методом ПВЭЭО.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
2. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 82. No. 3. P. 158–167.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
4. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 3. С. 2–9.
5. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексакин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
6. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
7. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
8. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
9. Большаков В.А., Солодилов В.И., Корохин Р.А., Кондрашов С.В., Меркулова Ю.И., Дьячкова Т.П. Исследование трещиностойкости полимерных композиционных материалов, изготовленных методом инфузии с использованием различных концентратов на основе модифицированных УНТ // Труды ВИАМ. 2017. № 7 (55). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-9-9.
10. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
11. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
12. Вашуков Ю.А. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов: мультимедийный образовательный модуль / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (Нац. иссл. ун-т). Электрон., текстовые и граф. дан. (3766 Кбайт, печатный аналог 185 с.). Самара, 2012. 1 эл. опт. диск (CD-R).

13. Степанов А.А., Шемелов Ю.Ю. Разрезка органопластика кругами из алмазов и электрокорунда // *Сверхтвердые материалы*. 1980. № 3. С. 37–41.
14. Токарев Д.И., Матыгулина Е.В. *Механическая обработка пластиков: учеб. пособие*. Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политехн. ун-та, 2019. 71 с.
15. Воробей В.В. *Технология производства конструкций из композиционных материалов*. М.: Изд-во МАИ, 1996. 178 с.
16. Тихомиров Р.А., Николаев В.И. *Механическая обработка пластмасс*. Л.: Машиностроение, 1975. 208 с.
17. Штучный Б.П. *Механическая обработка пластмасс: справочник*. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.
18. Ярославцев В.М. *Обработка резанием полимерных композиционных материалов: учеб. пособие*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 32–58.
19. Минибаев М.И., Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ на станках с ЧПУ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 1 (73). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
20. Sheikh-Ahmad J.Y. *Machining of Polymer Composites*. Springer Science Business Media, 2009. 307 p.
21. Zeng J., Kim T.J. Development of an abrasive water jet kerf cutting model for brittle materials // *Jet Cutting Technology. Fluid Mechanics and Its Applications*. Dordrecht: Springer, 1992. Vol. 13. P. 483–501. DOI: 10.1007/978-94-011-2678-6_33.
22. Дышенко В.С., Раскутин А.Е., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Гидроабразивная резка углепластика на основе плетеных преформ // *Технологии и качество*. 2018. № 2 (40). С. 32–36.
23. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R. Improving the Efficiency of Electrical Discharge Machining of Special-Purpose Products with Composite Electrode Tools // *Materials*. 2021. Vol. 14. Is. 20. Art. 6105. DOI: 10.3390/ma14206105.
24. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of Wire-Cut Electro Discharge Machining of Polymer Composite Materials // *Micromachines*. 2021. Vol. 12. Is. 5. Art. 571. DOI: 10.3390/mi12050571.
25. Hsissou R., Benhiba F., Echihi S. et al. New epoxy composite polymers as a potential anticorrosive coatings for carbon steel in 3.5 % NaCl solution: Experimental and computational approaches // *Chemical Data Collections*. 2021. Vol. 31. Art. 100619. DOI: 10.1016/j.cdc.2020.100619.
26. Hsissou R., Bekhta A., Dagdag O. et al. Rheological properties of composite polymers and hybrid nanocomposites // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. Is. 6. Art. e04187. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04187.
27. Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibresizings // *Polymer Testing*. 2020. Vol. 85. Art. 106421. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2020.106421.
28. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.

References

1. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft building and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbuty*, 2017, no. 5–6. pp. 40–44.
2. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 82, no. 3, pp. 158–167.
3. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
4. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. Study of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer. *Vse materialy. Encyklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 3, pp. 2–9.
5. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmelnitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.

6. Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Petrova G.N., Mekalina I.V. Constructional polymer composites with functional properties. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
7. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 5, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
8. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 11, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-106.
9. Bolshakov V.A., Solodilov V.I., Korokhin R.A., Kondrashov S.V., Merkulova Yu.I., Dyachkova T.P. Research of crack resistance of polymeric composite materials fabricated by infusion using various concentrates on the basis of modified CNT. *Trudy VIAM*, 2017, no. 7 (55), paper no. 9. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-9-9.
10. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*: textbook. St. Petersburg: Professiya, 2008, 560 p.
11. Bataev A.A., Bataev V.A. *Composite materials: structure, production, application*: textbook. Novosibirsk: NGTU, 2002, 384 p.
12. Vashukov Yu.A. *Technology of rocket and aerospace structures from composite materials: a multimedia educational module*. Electronic, text and graph. dates (3766 KB, printed version 185 pages). Samara, 2012. CD-R.
13. Stepanov A.A., Shemelov Yu.Yu. Cutting organoplastic with circles of diamonds and electrocorundum. *Sverkhтвердые материалы*, 1980, no. 3, pp. 37–41.
14. Tokarev D.I., Matyugulina E.V. *Machining of plastics*: textbook. Perm: Publishing House Perm Nat. Research Polytech. University, 2019, 71 p.
15. Vorobey V.V. *Technology for the production of structures from composite materials*. Moscow: MAI publishing house, 1996, 178 p.
16. Tikhomirov R.A., Nikolaev V.I. *Mechanical processing of plastics*. Leningrad: Mashinostroenie, 1975, 208 p.
17. Piece B.P. *Machining of plastics*: handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 152 p.
18. Yaroslavtsev V.M. *Machining of polymer composite materials*: textbook. Moscow: Publ. house of MSTU im. N.E. Bauman, 2012, pp. 32–58.
19. Minibaev M.I., Raskutin A.E., Goncharov V.A. Peculiarities of technology production specimens of PCM on CNC machines (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
20. Sheikh-Ahmad J.Y. *Machining of Polymer Composites*. Springer Science Business Media, 2009, 307 p.
21. Zeng J., Kim T.J. Development of an abrasive water jet kerf cutting model for brittle materials // *Jet Cutting Technology. Fluid Mechanics and Its Applications*. Dordrecht: Springer, 1992, vol. 13, pp. 483–501. DOI: 10.1007/978-94-011-2678-6_33.
22. Dyshenko V.S., Raskutin A.E., Donetskskii K.I., Karavaev R.Yu. Hydroabrasive cutting of carbon plastic based on woven preforms. *Tekhnologii i kachestvo*, 2018, no. 2 (40), pp. 32–36.
23. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R. Improving the Efficiency of Electrical Discharge Machining of Special-Purpose Products with Composite Electrode Tools. *Materials*, 2021, vol. 14, is. 20, art. 6105. DOI: 10.3390/ma14206105.
24. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of Wire-Cut Electro Discharge Machining of Polymer Composite Materials. *Micromachines*, 2021, vol. 12, is. 5, art. 571. DOI: 10.3390/mi12050571.

25. Hsissou R., Benhiba F., Echihi S. et al. New epoxy polymer composites as a potential anticorrosive coatings for carbon steel in 3.5 % NaCl solution: Experimental and computational approaches. *Chemical Data Collections*, 2021, vol. 31, art. 100619. DOI: 10.1016/j.cdc.2020.100619.
26. Hsissou R., Bekhta A., Dagdag O. et al. Rheological properties of composite polymers and hybrid nanocomposites. *Heliyon*, 2020, vol. 6, is. 6, art. e04187. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04187.
27. Thomason J. A review of the analysis and characterization of polymeric glass fibres. *Polymer Testing*, 2020, vol. 85, art. 106421. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
28. Gunyayeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimentenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.

Информация об авторах

Дышенко Вячеслав Сергеевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Донецкий Кирилл Игоревич, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Минибаев Марат Инсафович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Абляз Тимур Ризович, заместитель заведующего кафедрой, к.т.н., ФГАОН ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», enter@pstu.ru

Шлыков Евгений Сергеевич, доцент кафедры, к.т.н., ФГАОН ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», enter@pstu.ru

Ширяев Владислав Витальевич, аспирант, ФГАОН ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», enter@pstu.ru

Information about the authors

Vyacheslav S. Dyshenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill I. Donetskiy, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.) NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marat I. Minibaev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Timur R. Ablyaz, Deputy Head of Chair, Candidate of Sciences (Tech.), Perm National Research Polytechnic University, enter@pstu.ru

Evgeny S. Shlykov, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), Perm National Research Polytechnic University, enter@pstu.ru

Vladislav V. Shiryaev, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, enter@pstu.ru

Статья поступила в редакцию 15.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.12.2021.
The article was submitted 15.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 20.12.2021.