

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31

## ОСОБЕННОСТИ РЕЗКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ (обзор)

И.А. Хрульков<sup>1</sup>, И.Н. Гуляев<sup>1</sup>, С.И. Мишкин<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Производство полимерных композиционных материалов в 2020-е гг. и в перспективе до 2030-х гг. будет постоянно расти, несмотря на пандемию и другие препятствия современной действительности. И хотя конструкции изделий становятся все более интегральными, перед производителями все равно стоит задача выбора вида их механической обработки. Использование механической обработки алмазными кругами на станках с водяным охлаждением позволяет осуществлять резку различных композитов (стекло-, угле-, органопластиков и гибридных материалов) с требуемыми точностью и качеством.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, механическая обработка, сверление, фрезерование, гидрорезка, резка алмазным кругом

**Для цитирования:** Хрульков И.А., Гуляев И.Н., Мишкин С.И. Особенности резки полимерных композиционных материалов алмазными кругами (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31.

Scientific article

## FEATURES OF CUTTING POLYMER COMPOSITE MATERIALS WITH DIAMOND WHEELS (review)

I.A. Khrulkov<sup>1</sup>, I.N. Gulyaev<sup>1</sup>, S.I. Mishkin<sup>1</sup>

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

**Annotation.** The production of polymer composite materials (PCM) in the twenties and in the future until 2030 will continue to grow, despite the pandemic and other obstacles of modern reality. And although the designs are becoming more integral, manufacturers are still faced with the task of choosing the type of machining. The use of machining with diamond wheels on water-cooled machines allows cutting various composites (fiberglass, carbon fiber, organoplastics and hybrid materials) with the required precision and quality.

**Keywords:** polymer composite materials, machining, drilling, milling, waterjet cutting, diamond wheel cutting

**For citation:** Khrulkov I.A., Gulyaev I.N., Mishkin S.I. Features of cutting polymer composite materials with diamond wheels (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31.

## Введение

Производство полимерных композиционных материалов (ПКМ) в 2020-е гг. и в перспективе до 2030-х гг. будет постоянно расти, несмотря на пандемию и другие препятствия современной действительности [1–4]. И хотя конструкции изделий становятся все более интегральными, перед производителями все равно стоит задача выбора механической обработки для придания им требуемых по качеству сопрягаемых поверхностей с необходимой точностью по размеру и положению отверстий, заданной шероховатостью поверхности, а также определения экономически целесообразной технологии при учете планируемой серии, типа материала и других требований [5–8]. В настоящее время уже невозможно остановить бурное развитие производств, использующих ПКМ для изготовления различных деталей в самолето-, судо-, автомобилестроении, ЖКХ, строительстве, энергетике и других отраслях промышленности. При этом активно осваиваются как ручные, так и автоматизированные, как автоклавные, так и безавтоклавные технологии [9–12]. Сначала композиционные материалы применяли с большой осторожностью в деталях, не являющихся критическими с точки зрения надежности и безопасности конструкции. Однако постепенно их внедряли в такие ответственные детали, как механизация крыла, хвостовое оперение, а затем из данных материалов стали конструировать и изготавливать уже само крыло, детали двигателя и фюзеляж [1–3]. С целью планирования разработок материалов для таких конструкций разработана стратегия проведения исследований и внедрения в конструкции новых ПКМ.

При этом практически во всех случаях после формования и отверждения детали необходимо применять механическую обработку [5, 6, 13]. В процессе выкладки заготовок также производится резка препрегов или сухих заготовок для последующих их сборки в заготовки для пропитки связующим при процессах инфузии либо пропитки под давлением, а затем отверждения под вакуумным мешком или в автоклаве.

Цель данной работы – рассмотрение различных видов механической обработки, их достоинств и недостатков, а также попытка определиться с выбором вида механической обработки. Более подробно рассмотрена резка композиционных материалов кругами с алмазным напылением или наплавленной режущей кромкой с алмазами.

## Способы механической обработки ПКМ

Под механической обработкой понимают изменение (путем удаления части материала) геометрических размеров обрабатываемого материала. Единой общепринятой классификации механической обработки не существует, но в первом приближении ее можно сформировать по следующим критериям (пункты даны по мере увеличения их значимости):

– требуемая среда (воздух, инертный газ, жидкость, их комбинация), в которой производят механическую обработку материала;

– необходимость наличия принудительного охлаждения обрабатываемого материала. Для охлаждения можно использовать струю газа и (или) воздуха, а также охлаждающую жидкость (чаще всего на основе воды, но применяют и другие жидкости, например спирт);

– метод воздействия (для изменения геометрических размеров) на обрабатываемый материал: лазерная, ультразвуковая, гидро- и гидроабразивная резка, обработка инструментом (точение, фрезерование, сверление, шлифование, резка абразивным кругом) и др.

На выбор конкретного способа механической обработки влияют следующие факторы:

- характеристики обрабатываемого материала;
- требуемое качество обработанной поверхности;
- серийность (программа);
- наличие соответствующего оборудования.

Выбор конкретного метода механической обработки осуществляют согласно критерию «стоимость–эффективность» – получить требуемый результат при минимуме затрат.

Характеристика обрабатываемого материала (для ПКМ) зависит от вида связующего (матрицы) и наполнителя. Для отдельных существующих типов стекло-, угле- и органопластиков, а также металлополимеров не требуется специальной среды для проведения механической обработки (иными словами, производить механическую обработку можно на воздухе). Однако если матрица является высокодеформативной (состоящей из термопластичных и термореактивных смол), а также если температура при механической обработке превышает температуру деструкции материала, то при данном процессе необходимо осуществлять охлаждение. В противном случае в зоне резания или другого механического воздействия происходят сильный нагрев и плавление материала или его распад от термического перегрева.

В отличие от металлов на эксплуатационные характеристики ПКМ существенно влияют такие факторы, как их водо- и влагопоглощение, поэтому при механической обработке следует учитывать это обстоятельство. Однако кратковременное (до десятков минут) попадание ПКМ во влагонасыщенную среду с последующей их сушкой при комнатных условиях в течение суток сводят данное влияние на нет (исключение составляют те ПКМ, матрицы и (или) наполнители которых не выдерживают даже кратковременного контакта с водой). Можно для охлаждения использовать воздух, инертные газы и не содержащие воду жидкости. Однако применение инертных газов увеличивает стоимость процесса из-за требований по защите персонала, а использование воздуха или не содержащих воду жидкостей повышает пожароопасность процесса механической обработки.

С такими же ограничениями, как применение водяного охлаждения, связано использование процесса гидро- и гидроабразивной резки. Более того, при применении данного метода механической обработки ПКМ возникают проблемы с обеспечением требуемой чистоты реза и побочным воздействием на материал (попытки использования гидрорезки на металлокомпозитах привели к их расслаиванию по границе «металл–ПКМ») [14].

Все существующие в настоящее время матрицы ПКМ подвержены термодеструкции (материал «горит»), поэтому использование метода лазерной резки не оправдано в еще большей степени, чем применение гидрорезки.

Исходя из особенностей строения ПКМ – достаточно пластичной матрицы и жестких волокон – следует учитывать процесс силового взаимодействия инструмента и материала при механической обработке [15–19]. Острота режущей кромки должна обеспечивать минимальное трение между инструментом и обрабатываемым материалом. Поэтому для каждого материала и для каждого вида обработки необходимо использовать соответствующие инструмент и технологические режимы. Так, например, для сверления отверстий могут быть рекомендованы сверла с алмазным покрытием на основе сплава N20C и со скоростью резания 150 м/мин, а также со скоростью подачи 0,06 мм/с на 1 оборот диска. При правильно выбранных инструменте и режимах получают качественное отверстие, а стойкость сверла позволяет осуществить сверление отверстий в количестве до 800 [8, 20].

### Качество и типовые дефекты при лезвийной обработке ПКМ

Полимерный композиционный материал состоит из относительно прочной матрицы и прочных волокон. Эта особенность определяет процессы, происходящие при его механической обработке. Матрица, обладая невысокой прочностью при растяжении, способствует расслоению ПКМ при воздействии на него сил резания. С целью препятствования этому процессу следует выбирать такие режимы, которые снижают усилия резки. Так, например, при сверлении необходимо подкладывать под материал прокладки, которые воспринимают усилия отрыва, чтобы тем самым предотвращать расслаивание. Аналогично при фрезеровании торцов с краев фрезеруемого материала устанавливают металлические обкладки, которые предотвращают расслоения ПКМ [8, 13].

Заточка инструмента зависит от вида механической обработки. Например, при сверлении малых отверстий малого диаметра задний угол лезвия инструмента должен быть увеличен [6].

В процессе механической обработки выделяется пыль, которую необходимо удалять. Это можно сделать с помощью местной вентиляции или использовать мокрую обработку, при которой пыль удаляется вместе с охлаждающей жидкостью.

Низкая теплопроводность ПКМ приводит к нагреву в зоне резки, который в свою очередь может приводить к деструкции полимера в зоне резки и даже к возгоранию.

Усилия, возникающие при механической обработке ПКМ, зависят от схем армирования материала, физических свойств наполнителя и связующего, угла заточки инструмента, режимов резания и др.

Угол армирования наполнителя оказывает наибольшее влияние на вид образования стружки и пыли. При увеличении угла резания к направлению армирующих волокон до ~60 градусов сила резания медленно повышается. При приближении размера этого угла к 90 градусам наблюдают резкое увеличение силы резания. При дальнейшем возрастании угла сила резания уменьшается. Наибольшее снижение силы резания наблюдают при угле резания в диапазоне 100–165 градусов.

Виды дефектов при сверлении отверстий показаны на рис. 1.

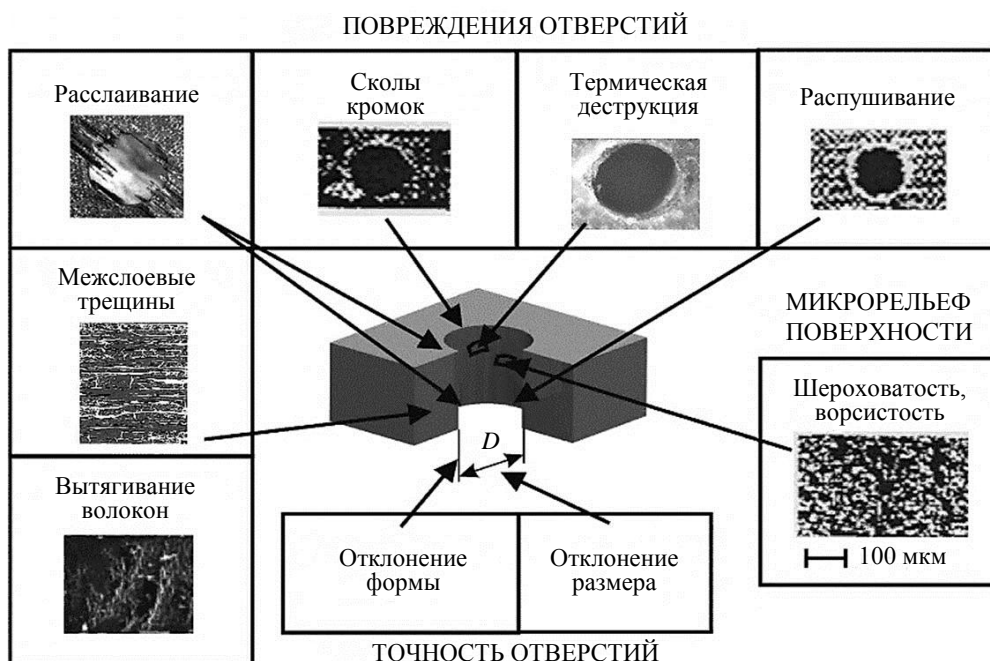


Рис. 1. Виды дефектов при сверлении отверстий [13]

**Виды механизмов резки и образования стружки и пыли**

При резании ПКМ механизм резки определяется направлением движения инструмента к углу армирования наполнителя в материале, вязкостью и теплостойкостью матрицы, углом заточки инструмента, скоростью резания, наличием или отсутствием охлаждающей жидкости.

При резке ПКМ с однонаправленным армированием под углом  $<180$  градусов, как правило, происходит образование стружки (рис. 2, а). Однако если связующее будет высокодеформативным или инструмент будет затуплен, то произойдут нагрев в зоне резания, расплавление связующего, а при сильном нагреве – деструкция и даже возгорание матрицы. В этом случае следует изменить технологический режим, т. е. уменьшить скорость подачи, применить охлаждающую жидкость, предусмотреть более острый угол заточки инструмента. Это относится и ко всем последующим типам резки. На рис. 2, б представлен тип резки II, когда угол резки составляет  $>180$  градусов. При этом происходит изгиб срезаемого слоя с изломом. При угле армирования наполнителя 45 градусов – тип резки III (рис. 2, в). В этом случае происходят перерезание волокон и смятие с изломом связующего. Аналогичен механизм образования стружки, пыли или расплавления и навалачивания смолы и волокон на режущий инструмент при углах резки 90 и 135 градусов [6, 7].

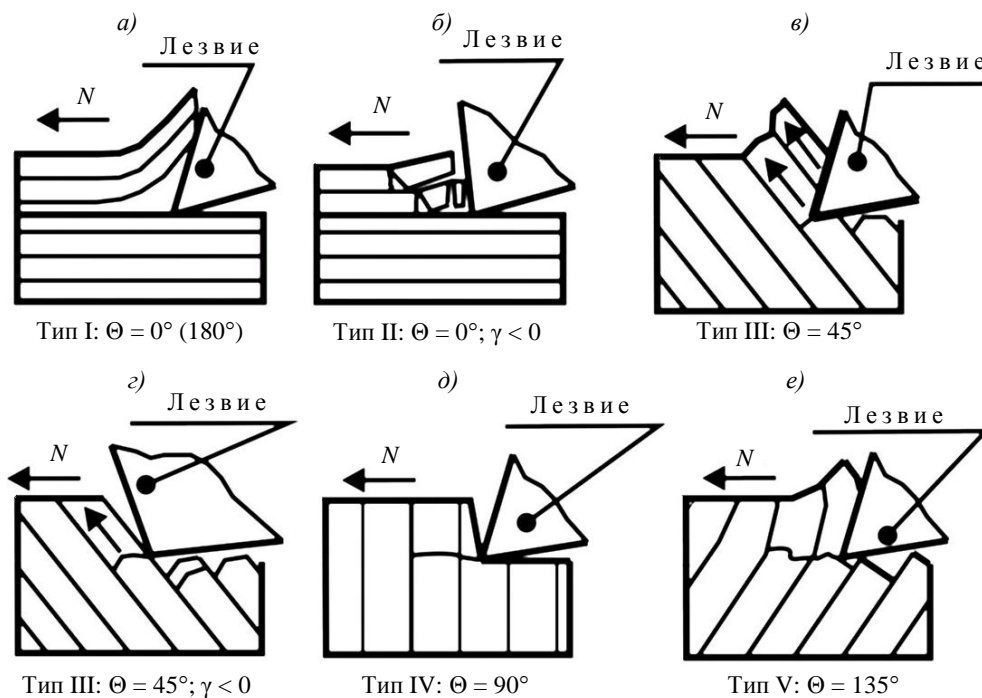


Рис. 2. Образование стружки и пыли в зависимости от угла армирования ПКМ [6] ( $N$  – направление схода стружки)

Желательно, чтобы угол заточки при резке был меньше или сопоставим с диаметром волокна. В противном случае волокна будут не перерезаться, а изгибаться с последующим изломом и образованием «бахромы».

Следует отметить, что при резке алмазным кругом, как правило, происходит резка по смешанным механизмам, так как алмазы в режущей части расположены хаотично. Поэтому при резке ПКМ с высоковязкой матрицей нужно обязательно использовать охлаждение данного процесса.

### Особенности процесса резки алмазными кругами

Рабочая кромка алмазного диска состоит из мягкого сплава, основу которого на 80 % составляет медь. В нее вплавлены частицы алмаза. Размер этих частиц колеблется от сотых долей до 0,5 мм. Алмазные круги с крупными зернами алмазов могут резать быстрее, но они будут уже не соскабливать ПКМ с поверхности, а откалывать более крупные части, в результате чего качество поверхности становится намного хуже. Если принять, что 0,878 мг алмазов в 1 мм<sup>3</sup> режущей зоны отрезного круга соответствует 100 %, то количество зерен алмазов, которые содержатся в рабочей зоне отрезного круга, колеблется в диапазоне от 25 до 200 % [21].

Основными технологическими параметрами при резке композиционных материалов являются:

- скорость резания, которая зависит от скорости вращения диска;
- усилие подачи образца при резании (скорость подачи);
- наличие подачи охлаждающей жидкости;
- геометрические размеры материала, определяемые условиями резки (при этом важную роль играют углы, под которыми находятся алмазные зерна при резке).

Понятно, что производительность процесса резания будет зависеть от скорости вращения алмазного диска и скорости подачи на 1 оборот диска. При этом скорость вращения диска ограничивается величиной, указанной в паспорте изготовителя. Так, например, для диска диаметром 250 мм производитель установил максимальную скорость 2674 об/мин. При этом во избежание разрушения диска рабочую скорость необходимо устанавливать менее указанной с учетом запаса прочности. Величина усилия подачи при резании должна быть достаточной, чтобы алмазные зерна резали материал, однако и не превышать значение, при котором алмазные зерна будут выдергиваться из связки. В том случае, если связующее обладает высокой вязкостью разрушения, могут происходить деформация и нагрев зоны резания, что также снижает возможность увеличения скорости подачи при резке. Схематично процесс резки материала алмазным кругом показан на рис. 3.

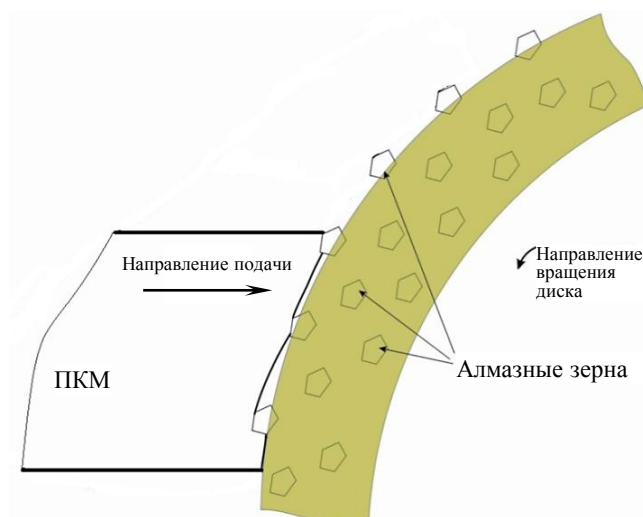


Рис. 3. Процесс резки ПКМ алмазным кругом [21]

Другим отрицательным эффектом при большом усилии является искривление диска из-за нагрева. Во избежание этого следует применять охлаждающую жидкость, что обеспечит охлаждение зоны резки и позволит избежать неприятных явлений. Таким

образом, выбор правильного режима резки и оптимального алмазного диска является основным требованием для осуществления качественной резки ПКМ.

На основании перечисленного ранее, а также исходя из опыта проведения работ можно сформулировать требования к отрезному абразивному кругу:

1. Режущая кромка отрезного абразивного круга должна иметь «острое» лезвие (подобно ножу), а не быть режущей плоскостью – в этом случае отрезной круг начинает рубить, а не резать (отрезной круг с двухсторонним коническим профилем – угловой согласно ГОСТ Р 53923–2010).

2. Для снижения усилия, необходимого для резания, размер отрезного круга должен обеспечивать угол резания к направлению армирующих волокон в диапазоне от 100–165 градусов.

3. Для механической обработки мелко- и в большинстве случаях среднесерийных партий изделий из ПКМ имеет смысл использовать абразивный круг на металлической подложке с алмазным напылением. Применение других типов напыления экономически нецелесообразно – экономия, полученная от использования недорогого режущего инструмента, не покрывает затраты на отработку технологии реза.

Требования к оборудованию (станку) для резки ПКМ отрезным абразивным кругом следующие:

1. Станок должен обеспечивать возможность раскручивания отрезного круга со скоростью не более 2700 об/мин (более высокая скорость раскрутки может привести к механическому разрушению существующих отрезных кругов).

2. Скорость подачи зависит как от диаметра отрезного круга, так и от характеристик обрабатываемого материала, но в среднем должна регулироваться в пределах от 0,01 до 3,00 мм/с. При этом наличие тактового режима (например, режима «3 мм вперед–2 мм назад»), применяемого для резки вязких металлов, для резания ПКМ необязательно.

3. Наличие водяного охлаждения режущего инструмента крайне желательно, поскольку оно не только позволяет избежать термодеструкции большей части ПКМ, но и удаляет получаемые при механической обработке стружку и пыль из рабочей зоны, а также дает возможность избежать изгибания в процессе реза для тонких (1,3 мм) отрезных кругов. Следует отметить, что водяное охлаждение прекрасно работает для большинства материалов на основе реактопластов, однако при этом для термопластов является бесполезным – например, при разрезании пластины из полиметилметакрилата отрезным кругом на материале образуется «бахрома».

### Заключения

1. Механическая обработка при изготовлении образцов для контроля свойств материала, а также для обрезки по контуру деталей и сверления в них отверстий остается одним из этапов производства конструкций из ПКМ.

2. Для изготовления прямоугольных образцов в настоящее время, как правило, применяют резку алмазными кругами. Режимы резания, размеры алмазных зерен и их количество, а также применение охлаждающей жидкости влияют на качество поверхности и, следовательно, на достоверность определяемых характеристик при испытаниях.

3. При правильном выборе скорости резания, типа круга, размера и количества алмазных зерен можно изготавливать образцы, отвечающие требованиям ГОСТов на испытания и получение уровня характеристик, которые близки к истинным значениям материала.

## Список источников

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Каблов Е.Н. Для освоения космоса нужны новые материалы // Научная Россия. URL: <https://scientificrussia.ru/interviews/akademik-e-n-kablov-dlya-osvoeniya-kosmosa-nuzhny-povyue-materialy> (дата обращения: 10.12.2021).
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.
6. Комплексная разработка методов повышения эффективности обработки труднообрабатываемых материалов за счет совершенствования режущих инструментов и условий их применения: отчет о научно-исследовательской работе / Сумск. гос. ун-т. Сумы: СумГУ, 2015. URL: <https://pandia.ru/text/80/580/14374-2.php> (дата обращения: 15.12.2021).
7. 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: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
8. Вавилин В.А., Пасечник К.А., Пушкарев А.Ю., Амельченко Н.А. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 1. С. 12–14.
9. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Липкость и возможность использования препрегов для автоматизированных технологий (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 8 (68). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
10. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
11. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезистивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
12. Хуанг Дж.-П., Юдин А.В., Тарасов И.В., Шевцов С.Н. Технология вакуумной инфузии в производстве композитных конструкций: проблемы и перспективы // Подготовка инженерных кадров в условиях цифровой трансформации: сборник науч. тр., посвящ. 80-летию РВПК ПАО «Роствертол» им. Б.Н. Слюсаря. Ростов н/Д: ДГТУ, 2019. С. 118–144.
13. Разработка методологии моделирования механической обработки отверстий в смешанных пакетах металл/композиционный материал: отчет о научно-исследовательской работе / рук. Д.В. Криворучко. Сумы: СумГУ, 2015. URL: <https://pandia.ru/text/80/642/96497-3.php> (дата обращения: 15.12.2021).
14. Грищенко Т.А., Мелюхов Н.И., Любушкин В.О. Применение гидроабразивной резки при обработке деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2017. № 2 (31). С. 49–55.
15. Елисеева А.В., Ровкин А.М., Тимошенко М.Д., Морев Д.С. Оптимальная обработка изделий из композиционных материалов // Молодой ученый. 2017. № 52 (186). С. 41–45.

16. Баурова Н.И., Макаров К.А. Механическая обработка деталей машин из полимерных композиционных материалов // *Технология металлов*. 2017. № 2. С. 15–19.
17. Андреев М.В., Шитюк А.А. Особенности высокоскоростной обработки полимерных композиционных материалов // *Ползуновский альманах*. 2016. № 4. С. 89–93.
18. Митясов Л.В. Особенности обработки углепластика // *Главный механик*. 2018. № 6. С. 6.
19. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Особенности технологии механической обработки углепластиков // *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2016. No. 5. P. 30–33.
20. Приписнов Я.А., Гришина О.И. Современные методы механической обработки композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61.
21. Особенности алмазной резки камня. URL: <https://k-mechanism.ru/osobennosti-processa-almaznoj-rezki-kamnya.html> (дата обращения: 15.12.2021).

### References

1. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
2. Kablov E.N. New materials are needed for space exploration. *Nauchnaya Rossiya*. Available at: <https://scientificrussia.ru/interviews/akademik-e-n-kablov-dlya-osvoeniya-kosmosa-nuzhny-novye-materialy> (accessed: December 10, 2021).
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2020-0-4-47-58.
4. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Raskutin A.E., Khrulkov A.V., Girsh R.I. Technological features of machining of composite materials when manufacturing details of designs (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 16, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.
6. *Integrated development of methods for improving the efficiency of processing hard-to-cut materials by improving cutting tools and the conditions for their use*: Report on the research work. Sumy, 2015. Available at: <https://pandia.ru/text/80/580/14374-2.php> (accessed: December 15, 2021).
7. 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: December 16, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
8. Vavilin V.A., Pasechnik K.A., Pushkarev A.Yu., Amelchenko N.A. Features of mechanical processing of polymer composite materials. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2018, vol. 1, pp. 12–14.
9. Timoshkov P.N., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Stickiness and possibility of using prepregs for automated technologies (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 25, 2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
10. Timoshkov P.N., Khrulkov A.V., Yazvenko L.N., Usacheva M.N. Composite materials for non-autoclave technology (review). *Proceedings of VIAM*. 2018, no. 3 (63). Art. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 16, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
11. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021. no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: December 16, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.

12. Huang J.-P., Yudin A.V., Tarasov I.V., Shevtsov S.N. Vacuum infusion technology in the production of composite structures: problems and prospects. *Training of engineering personnel in the context of digital transformation: a collection of scientific works*. Rostov-on-Don: DSTU, 2019, pp. 118–144.
13. *Development of a methodology for modeling the machining of holes in mixed metal/composite packages. Conducting research and development of a model of boundary phenomena in the processing of mixed packages on the example of the drilling process: Report on the research work*. Available at: <https://pandia.ru/text/80/642/96497-3.php> (accessed: December 15, 2021).
14. Grishchenko T.A., Melyukhov N.I., Lyubushkin V.O. The use of waterjet cutting in the processing of parts from polymer composite materials. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU*, 2017, no. 2 (31). pp. 49–55.
15. Eliseeva A.V., Rovkin A.M., Timoshenko M.D., Morev D.S. Optimal processing of products from composite materials. *Molodoy uchenyy*, 2017, no. 52 (186), pp. 41–45.
16. Baurova N.I., Makarov K.A. Machining of machine parts from polymer composite materials. *Tekhnologiya metallov*, 2017, no. 2, pp. 15–19.
17. Andreev M.V., Shityuk A.A. Features of high-speed processing of polymer composite materials. *Polzunovskiy almanakh*, 2016, no. 4. S. 89–93.
18. Mityasov L.V. Features of processing carbon fiber. *Glavnyy mekhanik*, 2018, no. 6, p. 6.
19. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V., Zaoistrovsky A.S. Features of the technology of mechanical processing of carbon fiber. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2016, no. 5, pp. 30–33.
20. Pripisnov Ya.A., Grishina O.I. Modern methods of mechanical processing of composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 16, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61.
21. *Features of diamond cutting of stone*. Available at: <https://k-mechanism.ru/osobennosti-processa-almaznoj-rezki-kamnya.html> (accessed: December 15, 2021).

#### Информация об авторах

**Хрульков Иван Александрович**, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Гуляев Иван Николаевич**, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Мишкин Сергей Игоревич**, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Ivan A. Khrulkov**, Leading engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ivan N. Gulyaev**, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Sergey I. Mishkin**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 30.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.01.2022.

The article was submitted 30.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 12.01.2022.