

Научная статья

УДК 621.924.93

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-51-60

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ УГЛЕПЛАСТИКА МАРКИ ВКУ-29

К.И. Донецкий¹, Т.Р. Абляз², Е.С. Шлыков², И.В. Осинников², В.Б. Блохин², К.Р. Муратов²

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; kanc@pstu.ru

Аннотация. Обработка с минимальным дефектообразованием является важным условием длительной эксплуатации полимерных композиционных материалов. Материалам, полученным по технологии копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО), также свойственны характерные дефекты. Исследовано влияние режимов КПЭЭО, наложенного токопроводящего слоя и материала электрода-инструмента на структуру поверхностного слоя конструкционного углепластика ВКУ-29. Получены технологические параметры КПЭЭО, обеспечивающие минимальное количество структурных дефектов полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углепластик, копировально-прошивная электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, режимы обработки, структурные дефекты

Для цитирования: Донецкий К.И., Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Осинников И.В., Блохин В.Б., Муратов К.Р. Исследование влияния процесса копировально-прошивной электроэрозионной обработки на структуру углепластика марки ВКУ-29 // Труды ВИАМ. 2024. № 6 (136). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-51-60.

Scientific article

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS ON THE STRUCTURE OF POLYMER COMPOSITE MATERIAL VKU-29

K.I. Donetskiy¹, T.R. Ablyaz², E.S. Shlykov², I.V. Osinnikov², V.B. Blokhin², K.R. Muratov²

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

²Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, Russia; kanc@pstu.ru

Abstract. Processing of polymer composite materials with minimal defect formation is an important prerequisite for their long-term operation. Materials produced by the technology of copy-piercing electrical discharge machining (EDM) under consideration are also characterized by characteristic defects. The influence of the EDM modes, the applied conductive layer and the electrode-tool material on the structure of the surface layer of structural carbon fiber reinforced plastic VKU-29 was studied. Technological parameters of EDM were obtained, ensuring the quality and efficiency of polymer composite materials, taking into account the minimal number of structural defects.

Keywords: polymer composite materials, carbon fiber polymer, copy-piercing electrical discharge machining, electrode-tool, processing modes, structural defects

For citation: Donetskiy K.I., Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Osinnikov I.V., Blokhin V.B., Muratov K.R. Study of the influence of the electrical discharge machining process on the structure of polymer composite material VKU-29. *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-51-60.

Введение

Материалы для изготовления ответственных изделий должны иметь физико-механические и эксплуатационные свойства, обеспечивающие их работоспособность при заданных нагрузках в определенной среде эксплуатации [1–4]. Изделия специального назначения представляют собой сложные технологические системы и, как правило, включают множество сборочных единиц и узлов, обладающих широкой номенклатурой действий [5–8]. Для обеспечения надежной и безотказной работы такие изделия следует изготавливать из материалов, обладающих высокой прочностью и износостойкостью в интервале рабочих температур [9, 10]. При изготовлении новых образцов техники в рамках работы Объединенной авиастроительной корпорации используются современные композиционные, в том числе полимерные, материалы. Отмечено, что ключевым направлением развития аэрокосмической техники является создание новых сложнопрофильных конструкций из перспективных материалов. Развитие космических технологий, авиации и других сопутствующих отраслей напрямую связано с проектированием, а также изготовлением перспективных отечественных двигателей и ракетных систем. Актуальны использование и внедрение новых функциональных материалов, в том числе жаропрочных и жаростойких сплавов, состоящих в основном из никеля и ниобия. Кроме того, необходимо развитие вертолетной техники с внедрением новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) и жаропрочных сплавов с высоким уровнем физико-механических свойств.

В настоящее время широко применяются современные армированные стеклянными и углеродными волокнами ПКМ, отличающиеся высокими значениями предела прочности, устойчивости к циклическим нагрузкам и ударным воздействиям, радиопрозрачности, а также устойчивости к знакопеременным нагрузкам и коррозии. Элементами армирования являются непрерывные продольные или поперечные волокна в виде нитей, жгутов, тканых или объемно-армирующих наполнителей. Такие материалы широко используются в авиации, судостроении, космической технике, автомобилестроении, специальном машиностроении. В качестве связующего применяют как терморезистивные (эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные и др.), так и термопластичные смолы [11].

Объемы выпуска ПКМ ежегодно растут в геометрической прогрессии. Стремительное наращивание скоростей производства сложных изделий, выполненных из новых материалов, происходит в странах Азиатско-Тихоокеанского региона.

Современные российские ПКМ обладают высокими упруго-прочностными характеристиками и эксплуатационной стабильностью, что позволяет обеспечить заданную работоспособность конструкций [12–14].

Специфические свойства ПКМ накладывают определенные ограничения на их механическую обработку: в процессе лезвийной обработки образуются сколы, вырывы волокон, расслоения и другие дефекты, снижающие эксплуатационные свойства изделий [15, 16]. Вследствие высокого уровня физико-механических свойств ПКМ возникают повышенные температурные и силовые воздействия на режущую часть инструмента, что вызывает выкрашивание режущей кромки (рис. 1). Связано это с концентрированием низкой теплопроводности в зоне резания ПКМ, что приводит к интенсификации адгезионных и диффузионных процессов.

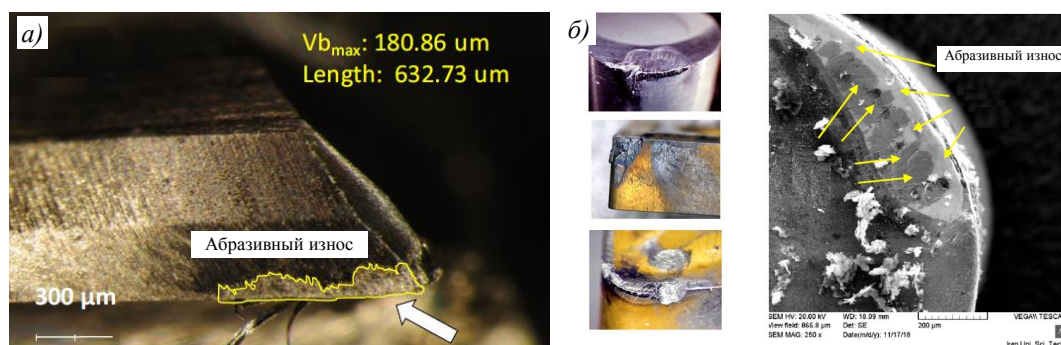


Рис. 1. Абразивный износ поверхности фрезы (а) и токарного инструмента (б)

Для решения описанной проблемы предлагается альтернативный способ копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО), позволяющий получать изделия заданной формы, размеров и качества с помощью электрических разрядов, действующих на токопроводный материал, и последующей электрической эрозии. Данная технология позволяет обрабатывать изделия из ПКМ без формирования дефектов, характерных для лезвийной обработки. Ограничивающим фактором применения технологии КПЭЭО для обработки ПКМ является низкая производительность.

Технология КПЭЭО имеет ряд преимуществ и зачастую дополняет другие методы, в частности высокоскоростную лезвийную обработку, а в ряде случаев – аддитивные способы получения сложнопрофильных изделий, например лазерное селективное сплавление. Развитие научно-производственных комплексов на базе ведущих предприятий – производителей электроэрозионного оборудования позволило повысить показатели качества и точность изготовления изделий. Скорость обработки новых функциональных материалов существенно зависит от применяемой технологии: КПЭЭО обеспечивает скорости резки, сопоставимые со скоростями большинства современных способов, в том числе механической обработки.

Одним из основных достоинств электроэрозионной обработки, способствующих внедрению технологии в современном машиностроении, является возможность обработки токопроводных и ограниченно токопроводных материалов с повышенным уровнем физико-механических свойств, а также изделий сложной формы. Современный лезвийный инструмент обладает технологической и экономической эффективностью при обработке материалов твердостью до 58 HRC. Для материалов твердостью 62–63 HRC данный вид обработки использовать неэффективно. Для композиционных углепластиков целесообразно применять КПЭЭО. Методика КПЭЭО с наложением токопроводящего слоя обеспечивает заданную скорость обработки без ухудшения качества поверхности ПКМ. Поверхность отверстия не имеет структурных и качественных нарушений слоев. Продолжительность КПЭЭО с использованием сплошной «маски» и с отверстием практически идентична. Ранее авторы данной статьи установили, что для разработки годной технологии получения изделий следует учитывать величину коррекции, которую можно рассчитать с помощью ширины зоны обработки и диаметра электрода-инструмента [16].

Распространение электроэрозионного метода значительно ограничивают негативные структурные изменения ПКМ, возникающие в процессе обработки. Экспериментальный анализ воздействия электроэрозионной обработки по разработанному алгоритму на структурные изменения в материале, а также внутренней структуры ПКМ осуществлен методом томографической съемки на микротомографе. Исследованы два образца различных размеров из конструкционного углепластика ВКУ-29.

Центральные области образцов характеризуются явно выраженной тканой структурой. Количество пустот, расслоений и прочих дефектов минимально. Периферия образцов, в отличие от центральной части, характеризуется областями с менее плотной структурой. В поверхностном слое образцов, распространяющемся в толщу материала на глубину 1 мм от обрабатываемой поверхности, попеременно наблюдаются области сильного оплавления и выкрашивания. Анализ результатов исследования продольных и поперечных сечений показал, что, хотя обработка не влияет на центральные области, в структуре образцов наблюдаются единичные пустоты и расслоения тканого материала. Наличие данных дефектов не зависит от процесса электроэрозионной обработки и обуславливается технологическими особенностями изготовления ПКМ.

Поверхности образцов, обработанные электроэрозионным методом, неоднородны по глубине и толщине. В наименее жестких областях, на которые процесс обработки оказывает наибольшее влияние, наблюдается множество структурных дефектов. Сколы материала, многочисленные пустоты, приповерхностное растрескивание и расслоение тканой структуры глубиной до 1 мм распределены по всей обработанной поверхности. Области оплавления обрабатываемого материала, характеризующиеся повышенной плотностью, дополняют мозаичную структуру.

В настоящее время существует потребность в разработке технологических рекомендаций, позволяющих подобрать рациональные режимы и параметры, обеспечивающие минимальное количество структурных дефектов ПКМ при КПЭЭО [17–19]. Актуальной задачей является получение экспериментальных зависимостей влияния параметров электроэрозионной обработки, наложенного токопроводящего слоя и материала электрода-инструмента на количество структурных дефектов в изделиях из ПКМ, обработанных методом КПЭЭО.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран углепластик марки ВКУ-29, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ», на основе однонаправленной углеродной ткани и расплавного эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212. Данный материал изначально предназначался для изготовления ряда конструкций мотогондолы двигателя ПД-14, таких как створки капота и реверсивное устройство (рис. 2) [20].

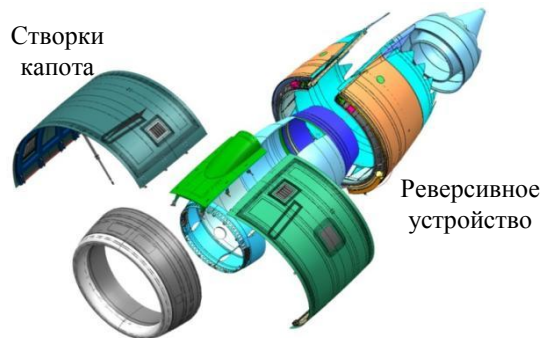


Рис. 2. Применение углепластика марки ВКУ-29 в конструкциях мотогондолы двигателя ПД-14

Проведено экспериментальное исследование процесса КПЭЭО углепластика ВКУ-29 при разных режимах и с применением электродов-инструментов с различными физико-механическими свойствами.

Обработку заготовки проводили в лаборатории электроэрозионной обработки ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» с использованием станка Electronica Smart CNC. В качестве рабочей жидкости применяли масло трансформаторное И-20А. Для проведения классических экспериментов

по электроэрозионной обработке ПКМ выбраны электроды-инструменты, выполненные из различных материалов: меди марки М1, графита марки ЭГ, композиционных материалов типа псевдосплав системы «медь + коллоидный графит» (CuC), в качестве основы использовали порошки меди ПМС-1 и сухого коллоидного графита марки С-1. Кроме того, проводили КПЭЭО с наличием токопроводящих слоев.

В таблице представлены режимы обработки, материалы электродов-инструментов и количество токопроводящих слоев из титана. При проведении эксперимента время включения импульсов ($T_{on} = 100$ мкс), напряжение ($U = 75$ В) и коэффициент заполнения импульсами ($T_{au} = 12\%$) были постоянны.

Режимы электроэрозионной обработки

Условный номер образца	Материал электрода-инструмента	Сила тока, А	Количество токопроводящих слоев из титана
1	Cu	2	–
2	Cu	1	–
3	Cu	6	–
4	Cu	2	1
5	Cu	2	2
6	C	2	–
7	C	1	–
8	Cu–C	2	–
9	Cu–C	1	–

В результате электроэрозионной обработки получены девять образцов для исследования микроструктуры ПКМ. Вырезанные фрагменты образцов заливали эпоксидным связующим ЭД-20 и выдерживали до затвердевания (рис. 3). На рис. 4 показаны образцы ПКМ в полимеризованном связующем.

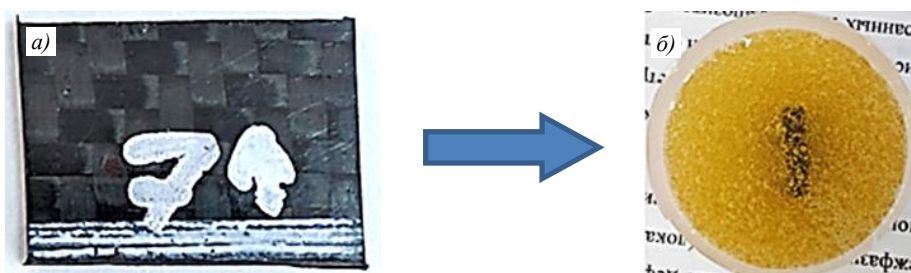


Рис. 3. Образец полимерного композиционного материала до (а) и после заливки эпоксидной смолой (б)

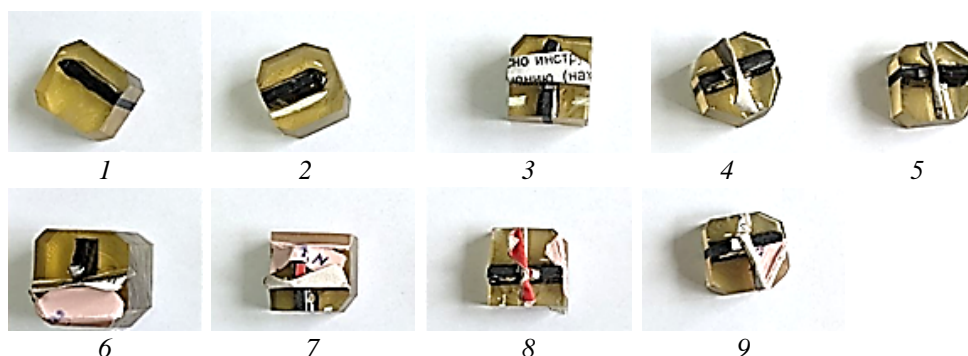


Рис. 4. Образцы полимерных композиционных материалов в полимеризованном связующем ЭД-20

Для удаления излишков смолы образцы обработаны шлифовальными шкурками зернистостью от 240 до 2500 (рис. 5).

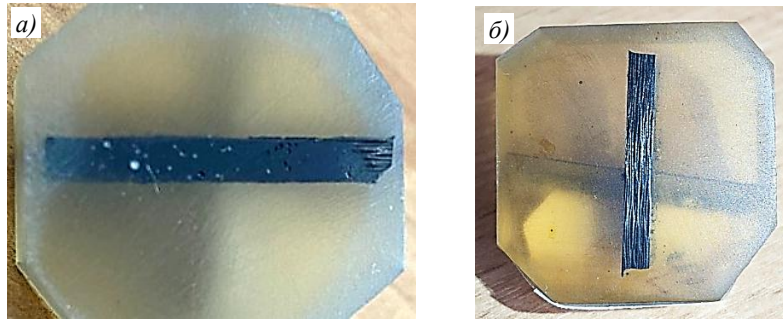


Рис. 5. Образцы полимерных композиционных материалов в полимеризованной смоле до (а) и после абразивной обработки (б)

Для удаления рисок после шлифовки образцы отполированы алмазной пастой, для обеспечения прозрачности поверхности – замшей. Увеличенные изображения образцов углепластика получены с помощью цифрового микроскопа.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

На рис. 6 представлены микроstructures образцов 1–6 с выделенными дефектами.

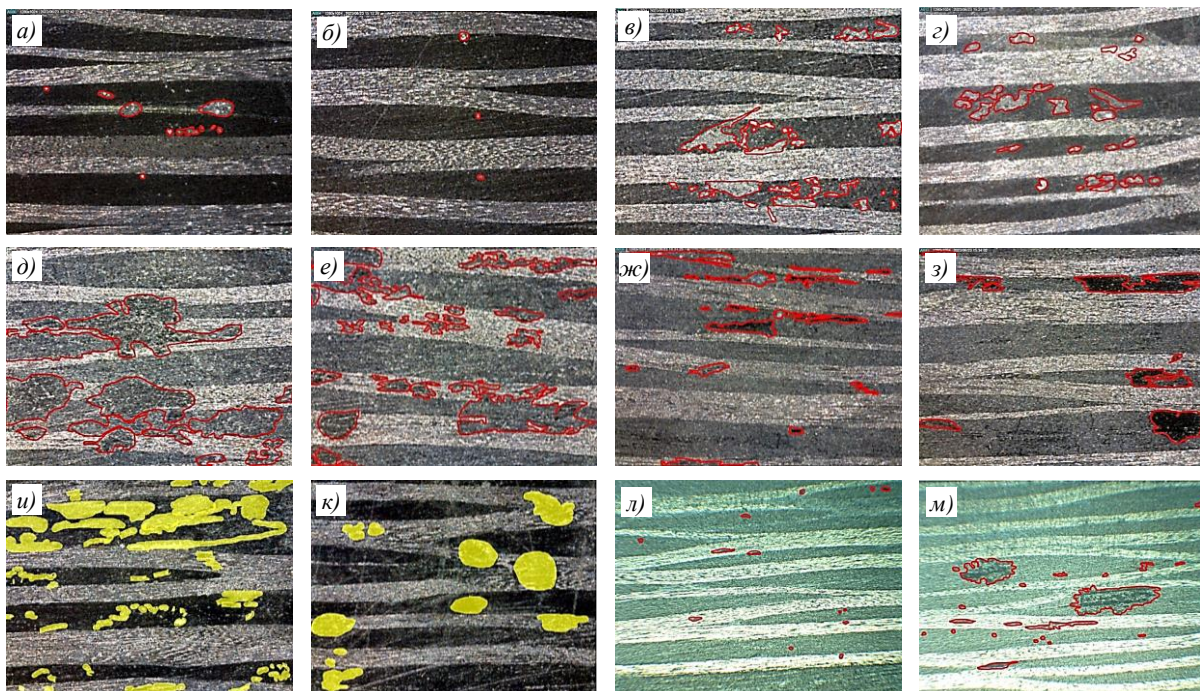


Рис. 6. Микроstructures образцов 1 (а, б), 2 (в, г), 3 (д, е), 4 (ж, з), 5 (и, к) и 6 (л, м) с выделенными дефектами

На изображениях образца 1 наблюдаются смоляные карманы и микропоры. Данные дефекты образуются на этапе изготовления ПКМ. Следов влияния КПЭЭО на поверхность материала не обнаружено.

В зоне воздействия электроэрозивной обработки образца 2 выявлены обширные дефектные области. Выкрашивание нитей и растрескивание матрицы более четко наблюдаются в области поперечных слоев в зависимости от расположения волокна (более темные области).

В образце 3 обнаружены более обширные дефектные области по сравнению с образцами 1 и 2, что объясняется большим термическим воздействием, связанным с параметрами режима обработки. Выкрашивание нитей наблюдается в области как продольных (более светлые зоны), так и поперечных слоев.

По сравнению с образцом 2 в образце 4 наблюдаются более обширные дефектные области в продольных и поперечных слоях. Изменения структуры также выявлены на границе раздела фаз «волокно–матрица» и в некоторых поперечных волокнах.

На изображениях образца 5 видны дефекты в области поперечных слоев (рис. 6, и) и немногочисленные точечные дефекты в области продольных слоев (рис. 6, к).

На поверхности образца 6 в основном наблюдаются точечные микродефекты (рис. 6, л). Два крупных дефекта обнаружены в центральной части поверхности образца (рис. 6, м).

На поверхности образца 7 выявлено множество крупных дефектов выкрашивания (черные пятна на рис. 7, а–в), также присутствуют точечные микродефекты (рис. 7, а, г, д).

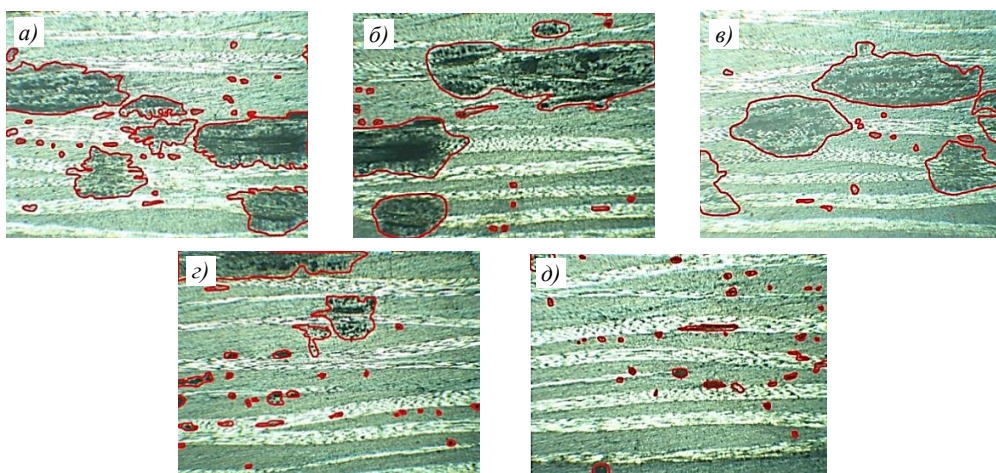


Рис. 7. Микроструктуры образца 7 с выделенными дефектами

На поверхности образца 8 наблюдаются дефекты с четкой границей контура (рис. 8, в, г) и один крупный дефект с размытым контуром (рис. 8, б). Наличие дефектов на границе слоев волокон свидетельствует о локальном нарушении адгезии между слоями (рис. 8, а–в).

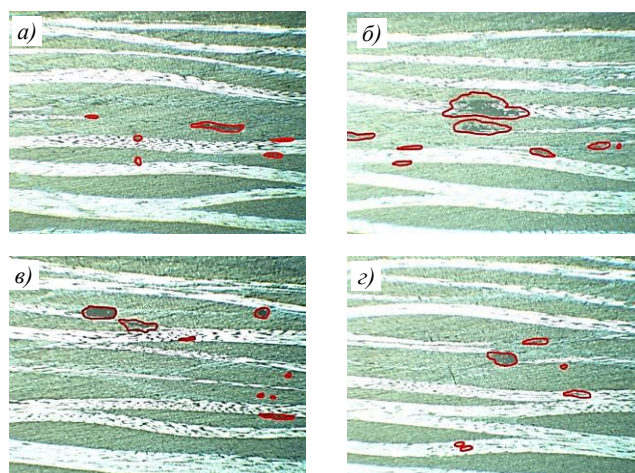


Рис. 8. Микроструктуры образца 8 с выделенными дефектами

На рис. 9 показаны микроструктуры образца 9, на которых выделены крупные дефекты с размытой границей и немногочисленные точечные микродефекты (рис. 9, б).

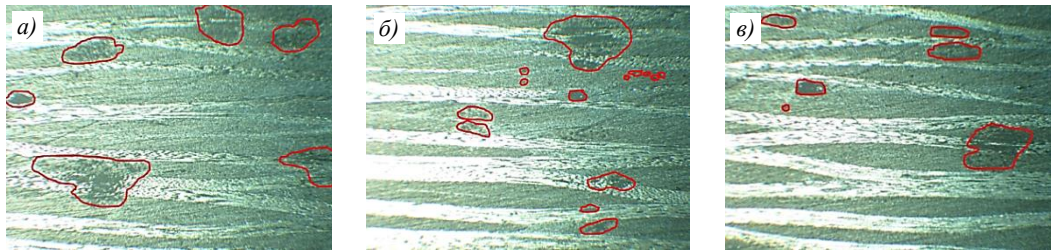


Рис. 9. Микроструктуры образца 9 с выделенными дефектами

Заключения

Исследовано влияние режимов КПЭЭО, наложенного токопроводящего слоя и материала электрода-инструмента на структуру поверхностного слоя конструкционного углепластика ВКУ-29. Показано, что, несмотря на повышение производительности при наложении токопроводящего слоя, количество структурных дефектов в поверхностном слое обрабатываемого материала увеличивается.

В образцах наблюдаются обширные дефектные области. Дефекты найдены в областях как продольных, так и поперечных слоев. Изменения структуры, обнаруженные на границе раздела фаз «волокно–матрица» и в некоторых поперечных волокнах, свидетельствуют о локальном нарушении адгезии между слоями. Выявлены как крупные, так и точечные дефекты.

Наименьшее количество дефектов на обработанных поверхностях ПКМ в процессе КПЭЭО наблюдается при силе тока 2 А и использовании в качестве материала электрода-инструмента композиционного материала типа псевдосплав системы «медь + коллоидный графит» (CuC). Наибольшее количество дефектов выявлено после обработки графитовым электродом-инструментом.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 23-79-01224 (<https://rscf.ru/project/23-79-01224>).

Список источников

1. Sarde B., Patil Y.D. Recent Research Status on Polymer Composite Used in Concrete-An Overview // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 18. P. 3780–3790.
2. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
3. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
4. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // *Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т.* СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
5. 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.
6. Батаев А.А., Батаев В.А. *Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник*. Новосибирск: НГТУ, 2002. 384 с.
7. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие*. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
8. Абляз Т.Р., Донецкий К.И., Шлыков Е.С., Муратов К.Р., Дышенко В.С., Минабаев М.И. Комплексный анализ методов обработки полимерных композитных материалов // *СТИН*. 2022. № 6. С. 5–8.

9. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных 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: 02.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
10. 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: 02.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
11. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
12. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
13. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
14. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
15. 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> (дата обращения: 05.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.
16. Штучный Б.П. Механическая обработка пластмасс: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.
17. Fukuzawa Y., Katougi H., Mohri N. et al. Machining properties of ceramics with an electric discharge machine // *Proceedings of the XII ISEM*. Dusseldorf: VDI Verlag, 1998. P. 445–454.
18. Mohri N., Fukuzawa Y., Tani T. et al. Assisting electrode method for machining insulating ceramics // *Annals CIRP*. 1996. No. 45 (1). P. 201–204.
19. Mohri N., Fukusima Y., Fukuzawa Y. et al. Layer generation process on work-piece in electrical discharge machining // *Annals CIRP*. 2003. No. 52 (1). P. 161–164.
20. 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. Sarde B., Patil Y.D. Recent Research Status on Polymer Composite Used in Concrete-An Overview. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 18, pp. 3780–3790.
2. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
3. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
4. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of materials of the new generation. *XXI Mendeleevsky Congress for General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
5. 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.
6. Bataev A.A., Bataev V.A. Compositional materials: structure, receipt, application: textbook. Novosibirsk: NSTU, 2002, 384 p.
7. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*: textbook. St. Petersburg: Profession, 2008, 560 p.

8. Ablyaz T.R., Donetskiy K.I., Shlykov E.S., Muratov K.R., Dyushenko V.S., Minibaev M.I. A comprehensive analysis of the methods of processing polymer composite materials. *STIN*, 2022, no. 6, pp. 5–8.
9. Tkachuk A.I., Donetskiy 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://www.journal.viam.ru> (accessed: April 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
10. 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: April 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
11. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
12. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 08, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
13. Baurova N.I., Zorin V.A. *The use of polymer composite materials in the production and repair of machines*: textbook. Moscow: MADI, 2016, 264 p.
14. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
15. Dyshenko V.S., Donetskiy 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*, 2018, no. 3 (109), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.
16. Film B.P. *Mechanical processing of plastic*: reference. Moscow: Mashinostroyenie, 1987, 152 p.
17. Fukuzawa Y., Katougi H., Mohri N. et al. Machining properties of ceramics with an electric discharge machine. *Proceedings of the XII ISEM*. Dusseldorf: VDI Verlag, 1998, pp. 445–454.
18. Mohri N., Fukuzawa Y., Tani T. et al. Assisting electrode method for machining insulating ceramics. *Annals CIRP*, 1996, no. 45 (1), pp. 201–204.
19. Mohri N., Fukusima Y., Fukuzawa Y. et al. Layer generation process on work-piece in electrical discharge machining. *Annals CIRP*, 2003, no. 52 (1), pp. 161–164.
20. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko 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

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

Абляз Тимур Ризович, доцент, заместитель заведующего кафедры, к.т.н., ФГАОУ ВО ПНИПУ, kanc@pstu.ru

Шлыков Евгений Сергеевич, доцент, к.т.н., ФГАОУ ВО ПНИПУ, kanc@pstu.ru

Осинников Илья Владимирович, аспирант, ФГАОУ ВО ПНИПУ, kanc@pstu.ru

Блохин Владимир Борисович, аспирант, ФГАОУ ВО ПНИПУ, kanc@pstu.ru

Муратов Карим Равилевич, доцент, д.т.н., ФГАОУ ВО ПНИПУ, kanc@pstu.ru

Information about the authors

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

Timur R. Ablyaz, Associate Professor, Deputy Head of the Department, Candidate of Sciences (Tech.), FAEI HE PNRPU, kanc@pstu.ru

Evgeny S. Shlykov, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), FAEI HE PNRPU, kanc@pstu.ru

Ilya V. Osinnikov, Graduate Student, FAEI HE PNRPU, kanc@pstu.ru

Vladimir B. Blokhin, Graduate Student, FAEI HE PNRPU, kanc@pstu.ru

Karim R. Muratov, Associate Professor, Doctor of Sciences (Tech.), FAEI HE PNRPU, kanc@pstu.ru

Статья поступила в редакцию 14.05.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.05.2024.
The article was submitted 14.05.2024; approved and accepted for publication after reviewing 14.05.2024.