

Научная статья

УДК 621.924.93

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-74-86

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

К.И. Донецкий¹, Т.Р. Абляз², Е.В. Плотников², Е.С. Шлыков²,
А.А. Каменских², И.В. Осинников², И.А. Пантелеев³, В.А. Мубассарова³

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

³Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия; adm@icmm.ru

Аннотация. Современные полимерные композиционные материалы способны обеспечить соответствие повышенным требованиям к упруго-прочностным характеристикам и эксплуатационной стабильности. Лезвийная обработка данных материалов связана с рядом технологических трудностей. Актуальной задачей является исследование процесса проволочно-вырезной электроэрозионной обработки полимерных композиционных материалов. Проведен полный факторный эксперимент. Получена теоретическая модель, позволяющая рассчитать значение коррекции движения инструмента при написании управляющей программы. Показана однородность структуры углепластика марки ВКУ-29.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углепластик, проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, межэлектродный зазор, томографическая съемка, факторный эксперимент

Для цитирования: Донецкий К.И., Абляз Т.Р., Плотников Е.В., Шлыков Е.С., Каменских А.А., Осинников И.В., Пантелеев И.А., Мубассарова В.А. Исследование процесса проволочно-вырезной электроэрозионной обработки полимерного композиционного материала // Труды ВИАМ. 2023. № 12 (130). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-74-86.

Scientific article

PROCESS RESEARCH OF WIRE-CUT ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

К.И. Donetskiiy¹, Т.Р. Ablyaz², Е.В. Plotnikov², Е.С. Shlykov²,
А.А. Kamenskih², I.V. Osinnikov², I.A. Panteleev³, V.A. Mubassarova³

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

³Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia; adm@icmm.ru

Abstract. *The modern polymer composite materials of the new generation are capable of meeting increased requirements for elastic-strength characteristics and their operational stability, which are necessary to ensure the operability of structures. Blade processing this materials is associated with a number of technological difficulties. An urgent task is the development of technology for wire-cut electrical discharge machining of polymer composite materials. A full factorial experiment was conducted. A theoretical model has been obtained that allows one to calculate the tool correction value when writing a control program for processing a part. A study of the 3D structure of the carbon composite material VKU-29 was carried out. It is shown that the structure of the composite is homogeneous.*

Keywords: *polymer composite materials, carbon fiber polymer, wire-cut electrical discharge machining, interelectrode gap, tomographic scanning, factorial experiment*

For citation: Donetskiy K.I., Ablyaz T.R., Plotnikov E.V., Shlykov E.S., Kamenskih A.A., Osinnikov I.V., Panteleev I.A., Mubassarova V.A. Process research of wire-cut electrical discharge machining of polymeric composite materials. *Trudy VIAM*, 2023, no. 12 (130), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-74-86.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция замещения металлических деталей машин на изделия из современных композиционных материалов. Развитие химических технологий в области синтеза позволяет получать полимерные композиционные материалы (ПКМ), обладающие высоким уровнем физико-механических свойств, что определяет экономическую эффективность их применения при создании изделий ответственного назначения.

Механические свойства ПКМ, такие как прочность, жесткость и деформируемость, во многом определяет наполнитель. Наиболее распространены наполнители в виде волокон или тканей, плетеные или 3D-армированные. Представлены на рынке и получили широкое распространение у разработчиков и изготовителей изделий из ПКМ ткани, однонаправленные ленты и ровинги (углеродные, стеклянные, базальтовые и органические) [1–7].

Монолитность материала, передачу напряжения в наполнителе и стойкость к различным внешним воздействиям обеспечивает матрица (связующее). Современные российские ПКМ созданы с использованием новых связующих, обладающих различными теплостойкостью и прочностью. Благодаря этому ПКМ могут соответствовать повышенным требованиям к упруго-прочностным характеристикам и эксплуатационной стабильности, которые необходимы для обеспечения работоспособности конструкций. Широкая вариативность требует отдельного подхода при выборе как технологий изготовления и обработки ПКМ, так и инструментария и методов контроля качества изготовленных из них изделий [8, 9].

Ярким примером реализации такого подхода может быть мотогондол двигателя ПД-14 для самолета МС-21, выполненная из материалов на основе углепластиков ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39, стеклопластика ВПС-48/7781 и др. разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Данные материалы прошли квалификационные испытания и применяются для изготовления современных изделий российской авиационной промышленности, налажено их производство [10, 11].

Для производства полноценных изделий из ПКМ требуется их дальнейшая обработка. Одним из сдерживающих факторов применения ПКМ является ограниченность технологических возможностей при обработке изготовленных изделий из-за специфических свойств пластиков [12, 13].

Часто в процессе механической обработки материала происходят расслоение пластика и скол связующего из-за недостаточного охлаждения и, соответственно, повышенной температуры зоны реза, при этом открывается доступ к текстильному

наполнителю. В итоге это приводит к образованию локального дефекта, а в дальнейшем – к снижению уровня эксплуатационных свойств изделия. Для получения перфорированных отверстий, глухих пазов и других конструктивных элементов часто используют механическую обработку. Несмотря на широкое распространение, лезвийная обработка изделий из ПКМ характеризуется рядом технологических сложностей: высокий износ инструмента, образование сколов и трещин в изделии. Кроме того, процесс сопровождается возникновением мелкодисперсной пыли, что является неблагоприятным фактором как для оператора, так и для технологического оборудования. Значения ширины реза не позволяют изготавливать и в дальнейшем обрабатывать изделия, имеющие небольшие габариты.

Наименьшую ширину реза можно обеспечить при использовании проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭЭО) [14–16]. С помощью данной технологии можно обрабатывать криволинейные профили с заданной точностью и изделия из ПКМ, имеющие малые габариты. Для осуществления ПВЭЭО необходимо создать высокую концентрацию энергии в зоне разряда. Пробой межэлектродного промежутка представляет собой плазменный канал, увеличивающийся со временем из-за высокого внутреннего давления [17].

Процесс образования пробоя зависит от множества факторов: свойств и степени загрязнения рабочей жидкости продуктами эрозии, материала электродов и др. После прохождения импульса тока напряжение между электродами отсутствует, происходит деионизация рабочей жидкости, т. е. нейтрализация заряженных частиц. Пространство между электродами подготавливается для нового прохождения очередного заряда. Вновь приложенное к электродам напряжение создает предпосылку к образованию следующего разряда электрического импульса, т. е. повторяется процесс образования стримера. Совокупность электрических разрядов, проходящих от электрода-детали к электроду-инструменту с определенной частотой следования, реализует процесс ПВЭЭО. Количества выделяемой тепловой энергии и снимаемого с поверхностей электродов материала неодинаковы. Данное неравновесие зависит от теплофизических свойств материалов электродов, параметров рабочих импульсов и полярности рабочих импульсов [18–23]. Варьируя этими факторами, можно увеличить или уменьшить эрозию электродов. Осуществление разряда регламентируется приложенным к электродам напряжением, временем формирования импульса, состоянием рабочей жидкости и величиной межэлектродного зазора.

В работах [21–23] исследованы возможности электроэрозионной обработки ПКМ. Установлено, что токопроводимость ПКМ ограничена из-за наличия связующего. Часто в роли связующего выступает эпоксидная смола, которая в процессе обработки разрушается на кромках отверстий за счет скалывания, высоких температур и неэффективного охлаждения поверхности [24].

В работах [25–28] изучена обработка материалов, обладающих низкой токопроводностью, методом ПВЭЭО. Установлено, что качество и точность создаваемых отверстий в материале, обладающем низкой токопроводностью, можно регулировать за счет наложения токопроводящего слоя-маски (рис. 1).

Одним из факторов, влияющих на точность обработки ПКМ данным методом, является величина межэлектродного зазора. Погрешность межэлектродного зазора зависит от неоднородностей структур электрода-инструмента и обрабатываемой заготовки, а также свойств рабочей жидкости.

Количество удаляемого с заготовки металла и размеры электроэрозионных лунок зависят от таких факторов, как свойства рабочей жидкости, физико-механические свойства ПКМ и параметры обработки. Соответственно, при обработке ПКМ на

поверхности заготовки образуются лунки различных размеров. Данный фактор существенно усложняет прогнозирование значения межэлектродного зазора и соблюдение точности ПВЭЭО [29]. На рис. 2 показано, что на точность обработки влияет совокупность различных факторов.

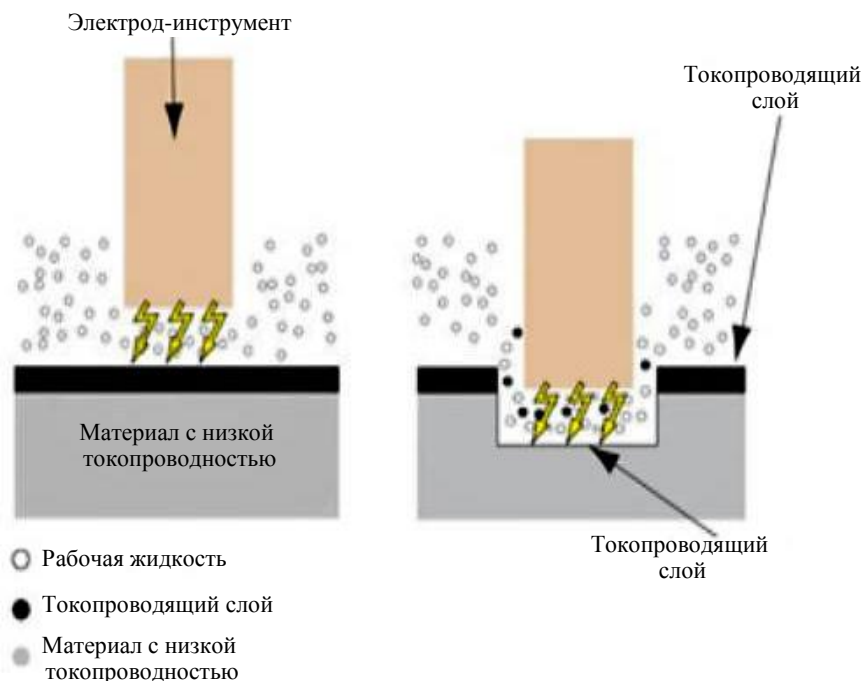


Рис. 1. Наложение токопроводящего слоя на материал с низкой токопроводностью

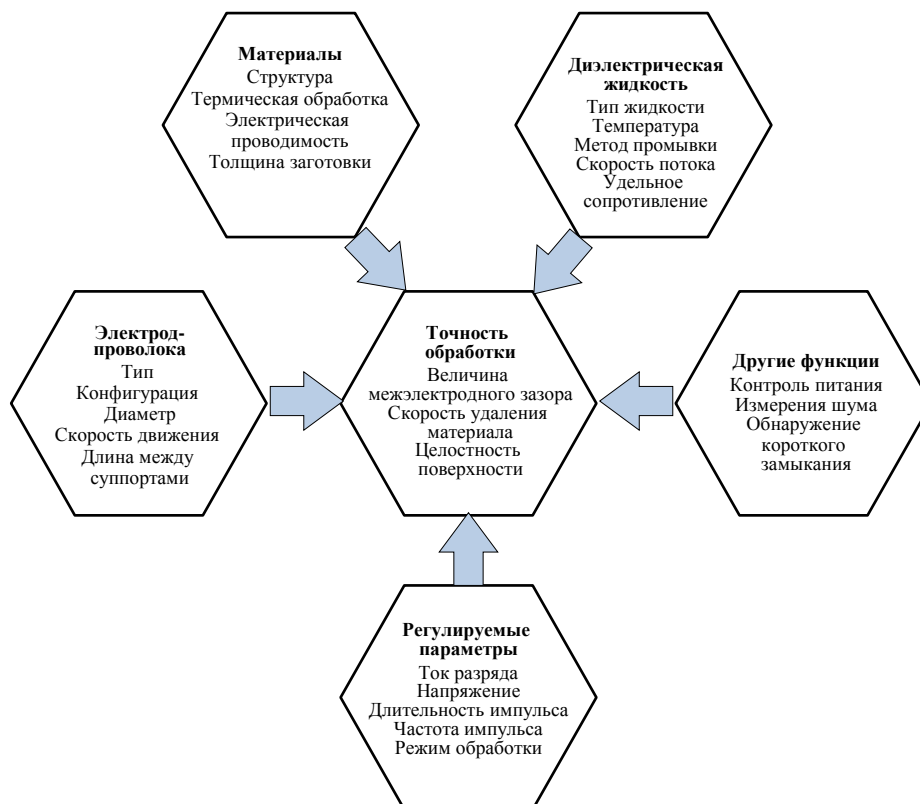


Рис. 2. Факторы, влияющие на точность проволочно-вырезной электроэрозионной обработки

В настоящее время существует потребность в разработке теоретических моделей, которые позволяют находить параметры ПВЭЭО полимерных композитов, обеспечивающие необходимую точность [30, 31].

Актуальной задачей является получение теоретической и эмпирической зависимостей точности ПВЭЭО поверхностей сложнопрофильных изделий, выполненных из ПКМ, от параметров электроэрозионной обработки, физико-механических свойств материала и толщины заготовки.

В данной работе представлены исследования, направленные на изучение ПВЭЭО углепластика марки ВКУ-29 разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Проведено факторное планирование эксперимента с целью получения зависимости величины межэлектродного зазора от режимов ПВЭЭО. Технология ПВЭЭО относится к бесконтактным методам резки. Следовательно, при расчете ширины реза следует учитывать размер электрода-инструмента ($2R$), величину межэлектродного зазора S и вносить корректировки в управляющую рабочую программу (рис. 3). Правильная коррекция позволит обеспечить необходимую точность обработки.

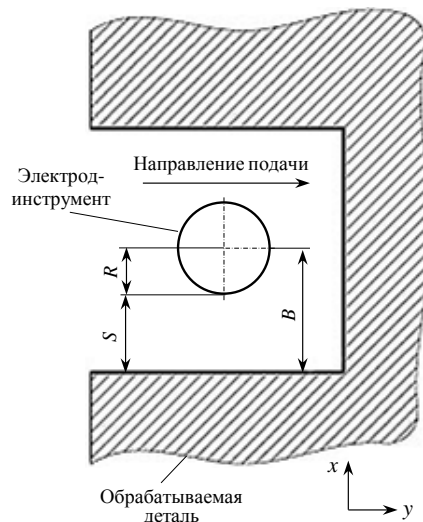


Рис. 3. Формирование величины коррекции B в плоскости обработки XY : R – радиус электрода-инструмента, м; S – межэлектродный зазор, м; B – коррекция, м

В качестве обрабатываемого материала выбрана пластина из углепластика толщиной 2 мм, токопроводящего слоя – титановая пластина толщиной 1 мм.

Эксперименты проводили на проволочно-вырезном электроэрозионном станке, в качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду. Обработку проводили при постоянной скорости смотки проволоки 1 м/мин.

Ширину реза измеряли на световом микроскопе при увеличении $\times 100$.

Для изучения внутренней структуры и влияния оригинального алгоритма электроэрозионной обработки тканого композиционного материала ВКУ-29 проведена томографическая съемка полученного образца на микротомографе, расположенном в Институте механики сплошных сред УрО РАН. Съемку осуществляли при следующих параметрах: напряжение на рентгеновской трубке 58 кВ, сила тока 92 мкА, разрешение (размер ребра вокселя) 3 мкм, время экспозиции 900 мс, шаг вращения образца 0,1 градуса со съемкой на 360 градусов с усреднением по трем кадрам. Продолжительность съемки составила 5 ч 12 мин.

Полученный стек из 3600 теневых проекций реконструирован в набор двумерных поперечных сечений с применением методик компенсации ошибки в определении положения образца, вызванной, как правило, дрейфом эмиттера источника рентгеновского излучения, тепловым расширением объекта съемки внутри или случайными механическими вибрациями [32].

Последующая обработка набора двумерных поперечных сечений в программном обеспечении СТАп включала анализ тканой структуры образца и выявление возможных дефектов.

Полученный стек рентгеноплотностных срезов использован для стереологических реконструкций и визуализации трехмерных моделей тканой структуры образца.

Экспериментальные исследования влияния режимов электроэрозионной обработки на величину межэлектродного зазора осуществляли по методу полного факторного эксперимента. Для проведения эксперимента поставлено 15 опытов, которые проводили в зависимости от выбранных режимов обработки согласно составленной матрице планирования.

Во время планирования эксперимента значения всех параметров кодировали линейным преобразованием координат факторного пространства. Проведена стыковка начала координат и нулевой точки, выбраны масштабы по осям соответственно единицам интервалов факторов варьирования.

В качестве входных факторов выбраны: U – напряжение, В; T_{on} и T_{off} – время включения и выключения импульса, мкс.

Кодировка входных параметров представлена в табл. 1. Значение ширины электроэрозионного реза является выходным параметром и представляет собой совокупность диаметра электрода-инструмента и величины бокового зазора.

Таблица 1

Кодировка параметров

Факторы	Уровень			«Звездное» плечо	
	нижний	верхний	средний	нижнее	верхнее
Напряжение U , В	50	100	75	40	110
Время включения импульса T_{on} , мкс	5	15	10	2	20
Время выключения импульса T_{off} , мкс	10	50	30	5	60

Для достоверности каждый эксперимент проводили в трехкратной повторности. Составлена матрица планирования эксперимента с учетом «звездного» плеча (табл. 2).

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

$X_1 (U, В)$	$X_2 (T_{\text{on}}, \text{мкс})$	$X_3 (T_{\text{off}}, \text{мкс})$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	X'_4	X'_5	X'_6
-1	-1	-1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27
+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27
-1	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27
+1	+1	-1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27
-1	-1	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27
+1	-1	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27
-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27
+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27
-1,215	0	0	0	0	0	0,746	-0,73	-0,73
+1,215	0	0	0	0	0	0,746	-0,73	-0,73
0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	0,746	-0,73
0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	0,746	-0,73
0	0	-1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	0,746
0	0	+1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	0,746
0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73

Значимость коэффициентов оценивали по критерию Стьюдента. Адекватность модели проверяли по критерию Фишера.

Результаты и обсуждение

Согласно проведенному полному факторному эксперименту и сопутствующему регрессионному анализу, получена регрессионная зависимость, с помощью которой можно рассчитать величину межэлектродного зазора:

$$Y = 0,03 + 0,0003U^2 - 0,003T_{\text{off}} - 0,003U + 0,0001T_{\text{on}}T_{\text{off}} - 0,0014T_{\text{on}} - 0,0003T_{\text{off}}^2 + 0,01T_{\text{off}}.$$

Анализ регрессионной зависимости, полученной для заготовки из конструкционного углепластика марки ВКУ-29, показал, что на значение ширины реза влияет совокупность всех входных факторов. Для наглядного изображения регрессионная зависимость представлена в виде гиперповерхности (рис. 4).

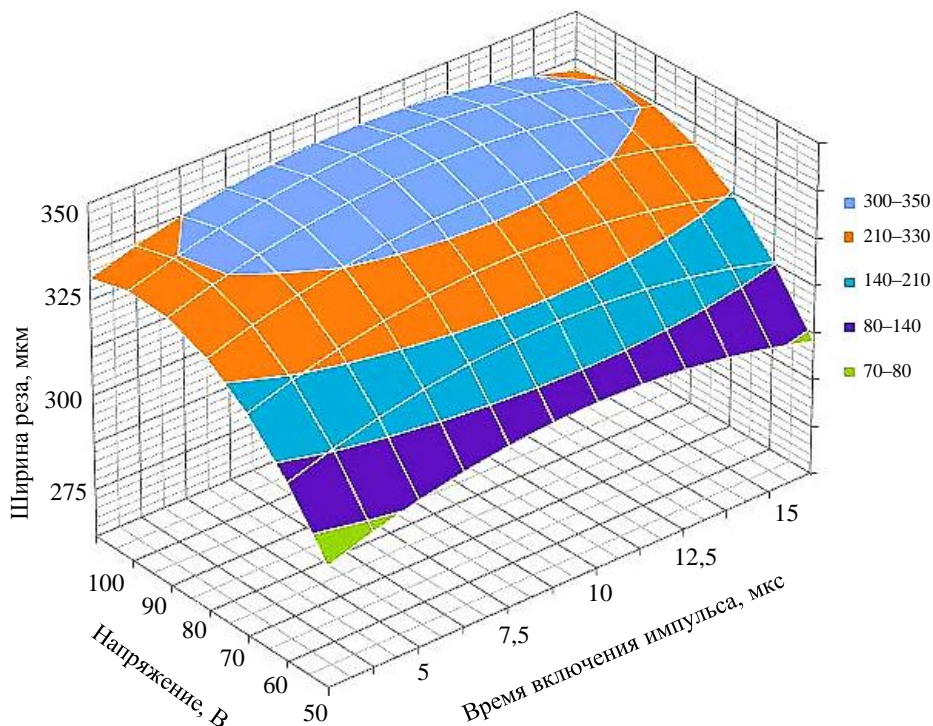


Рис. 4. Гиперповерхность при времени выключения импульса 10 мкс

На основе анализа полученной гиперповерхности сделан вывод, что при постоянном времени выключения импульса 10 мкс функция отклика изменяется по квадратичной зависимости, величина напряжения – по линейной зависимости. Установлено, что наибольшее значение ширины реза (350 мкм) достигается при напряжении 100 В и времени включения импульса 10 мкс, наименьшее (275 мкм) – при 50 В и 5 мкс соответственно. С помощью полученных результатов можно корректировать размер электрода-инструмента для обеспечения точности ПВЭЭО.

На основе полученной теоретической модели написана управляющая рабочая программа, обеспечивающая изготовление изделия типа «шестерня» с использованием проволочно-вырезного электроэрозионного станка с системой числового программного управления.

Обработку проводили при режимах, представленных в методике исследования: время включения и выключения импульса составляет 15 и 50 мкс соответственно, напряжение 50 В.

С использованием данной теоретической модели рассчитано значение коррекции траектории движения инструмента $B = 0,165$ мм. При обходе рабочего контура изделия типа «шестерня» значение коррекции движения инструмента вносят в управляющую программу с помощью команды G41.

На рис. 5 представлены фотография и схематический чертеж образца с характерными размерами; штриховкой обозначены области микротомографической съемки.

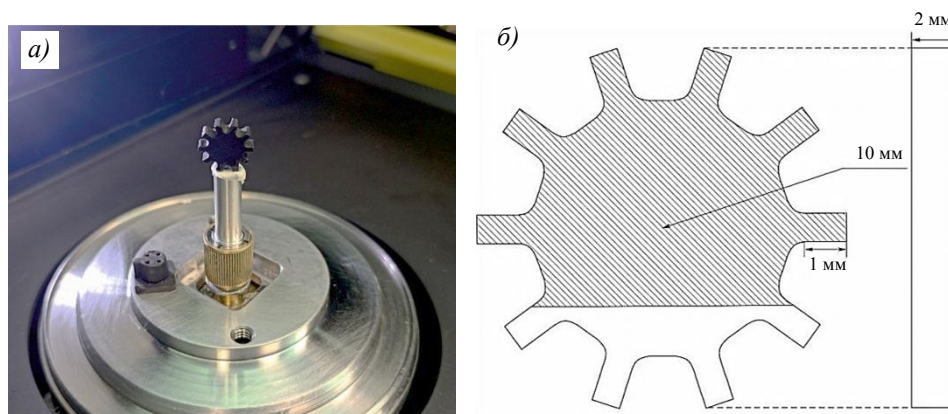


Рис. 5. Фотография (а) и чертеж (б) установленного для съемки образца (штриховкой обозначена область съемки)

При обеспечении стабильности процесса ПВЭЭО данная рабочая программа позволяет получить изделие типа «шестерня» с заданной точностью.

На рис. 6 представлена реконструированная 3D-структура образца.

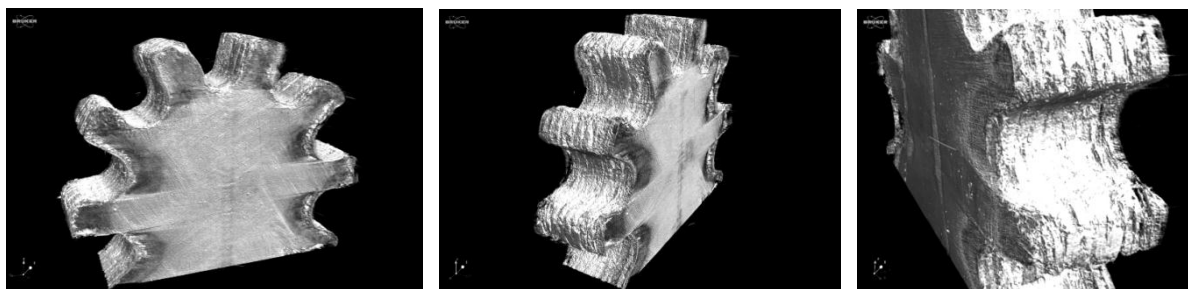


Рис. 6. 3D-изображения образца с разных ракурсов

На изображении в центральной части образца визуально определяется ориентация тканой структуры, в области зубьев шестерни наблюдаются области менее плотные, чем центральная часть.

Поверхность зубьев и прилегающая зона до глубины 1 мм также характеризуются областями сильного наплавления материала, чередующимися с полосами отсутствующего материала. Это объясняется его выкрашиванием в процессе электроэрозионной обработки (рис. 6 и 7).

Анализ продольных и поперечных сечений образца показал, что в структуре центральной области, не подвергавшейся электроэрозионной обработке, наблюдаются единичные дефекты в виде пустот и расслоений тканого материала (выделенные области на рис. 7, а, б). Глубина и толщина поверхности электроэрозионной обработки

неоднородны, в зубьях наблюдаются сколы материала (выделенные области на рис. 7, в, з). Многочисленные пустоты, приповерхностное растрескивание и расслоение тканой структуры, достигающее глубины до 1 мм, наблюдаются по всей поверхности обработки, а мозаичная картина дополняется областями повышенной плотности – наплавленным материалом (рис. 7).

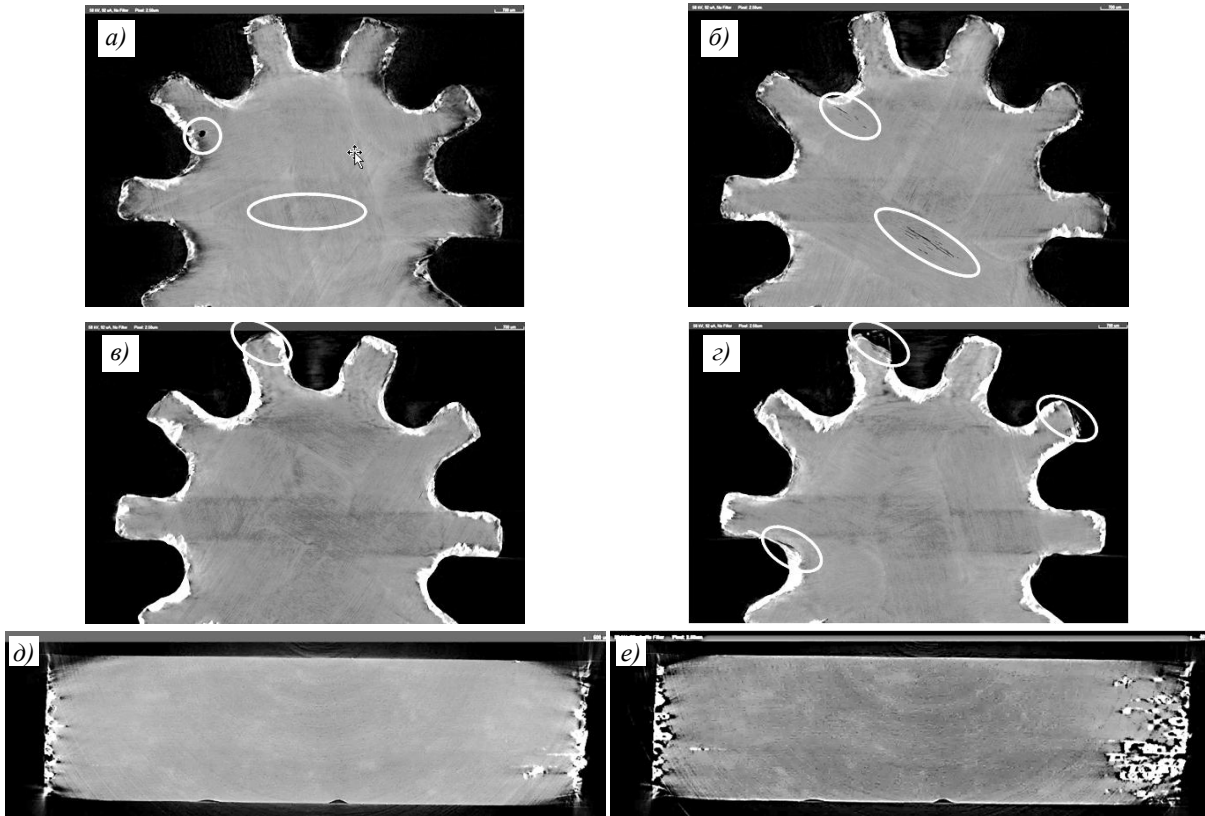


Рис. 7. Продольные (а–г) и поперечные (д, е) сечения образца

Заключения

Проведен полный факторный эксперимент и получена теоретическая модель, позволяющая рассчитать значение коррекции инструмента при написании управляющей программы обработки детали.

Исследована 3D-структура материала ВКУ-29 после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки методом компьютерной томографии. Показано, что структура композита является однородной, визуально определяется ориентация тканого полотна, наблюдаются единичные пустоты и дефекты.

Установлено, что при электроэрозионной обработке поверхности образца наблюдается мозаичная картина пустот, растрескиваний, сколов и расслоений композитного полотна с областями сильного наплавления материала до глубины 1 мм. Такая поверхностная и приповерхностная неоднородность материала, вызванная электроэрозионной обработкой, может привести в процессе эксплуатации к преждевременному разрушению изготовленных из него деталей. Актуально применение щадящих режимов чистовой обработки во избежание появления дефектов.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030».

Список источников

1. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
8. 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: 01.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-22-33.
9. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморезистивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.09.2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
10. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносоев 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.
11. 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: 20.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.
12. Абляз Т.Р., Донецкий К.И., Шлыков Е.С., Муратов К.Р., Дышенко В.С., Минибаев М.И. Комплексный анализ методов обработки полимерных композитных материалов // СТИН. 2022. № 6. С. 5–8.
13. 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: 20.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
14. Panner Selvam M., Ranjith Kumar P. Optimization Kerf Width and Surface Roughness in Wirecut Electrical Discharge Machining Using Brass Wire // Mechanics and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 21. No. 1. P. 37–55.
15. Maher I., Lingb L.H., Sarhan A.A.D. Improve wire EDM performance at different machining parameters – ANFIS modeling. IFAC-Papers OnLine 48-1, 2015. P. 105–110. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.05.109.
16. Mu-Tian Yan, Yi-Peng Lai. Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. No. 47. P. 1686–1694. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.01.006.

17. Abbas N.M., Solomon D.G., Bahari Md. F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007. No. 47. P. 1214–1228. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.
18. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Oglezneva S.A. Electrical Discharge Machining of Polymer Composites // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40. No. 10. P. 878–879.
19. Ablyaz T.R., Muratov K.R., Shlykov E.S. et al. Electric-Discharge Machining of Polymer Composites // *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 39. No. 10. P. 898900.
20. Fukuzawa Y., Katougi H., Mohri N. et al. Machining properties of ceramics with an electric discharge machine in: *Proceedings of the XII ISEM, 1998*. P. 445–454.
21. Mohri N., Fukuzawa Y., Tani T. et al. Assisting electrode method for machining insulating ceramics // *Annals CIRP*. 1996. No. 45 (1). P. 201–204.
22. 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.
23. Lauwers B., Kruth J.P., Liu W. et al. Investigation of Material Removal Mechanisms in EDM of Composite Ceramic Materials // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. No. 149. P. 347–352.
24. Puertas I., Luis C. A Study on the Electrical Discharge Machining of Conductive Ceramics // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 153–154/1–3. P. 1033–1038.
25. Kucukturk C., Çogun C. A New Method for Machining of Electrically Nonconductive Workpieces Using Electric Discharge // *Machining Technique, Machining Science and Technology*. 2010. Vol. 14. P. 189–207.
26. Hosel T., Müller C., Reinecke H. Simple Techniques of Spark Erosive Structuring of Electrically Nonconductive Zirconia (ZrO₂), 4M. *4M/ICOMM 2009, The Global Conference on Micro Manufacture, 2009*.
27. Wüthrich R., Fascio V. Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon – an overview // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. P. 1095–1098.
28. Schubert A., Zeidler H., Wolf N., Hackert M. Micro electro discharge machining of electrically nonconductive ceramics // *AIP Conference Proceedings: AIP, 2011*. P. 1303–1308.
29. Cnudde V., Boone M.N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications // *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 123. P. 1–17.
30. Feldkamp L.A., Jesion G. 3-D X-ray computed tomography // *Review Progress Quantitative Nondestructive Evaluation*. 1986. Vol. 5a. P. 555–566.
31. Hanna R.D., Ketcham R.A. X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies // *Geochemistry*. 2017. Vol. 77. Is. 4. P. 547–572.
32. Stock S.R., Sasov A., Liu X., Salmon P.L. Compensation of mechanical inaccuracies in micro-CT and nano-CT // *Developments in X-ray Tomography VI*; SPIE: Washington, DC, USA, 2008. <http://doi.org/10.1117/12.793212>.

References

1. *Application of polymer composite materials in the production and repair of machines*: textbook. Moscow: MADI, 2016, 264 p.
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), p. 3.
4. 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.
5. 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.

6. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Report XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vol. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
7. Slavin A.V., Donetskiy K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 26, 2023). DOI: 10.1877/2307-6046-2022-0-11-81-92.
8. 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://journal.viam.ru> (accessed: September 01, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
9. 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.
10. 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.
11. 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: September 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.
12. Ablyaz T.R., Donetskiy K.I., Shlykov E.S., Muratov K.R., Dyshenko V.S., Minibaev M.I. Complex analysis of methods for processing polymer composite materials. *STIN*, 2022, no. 6, pp. 5–8.
13. 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: September 20, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
14. Panner Selvam M., Ranjith Kumar P. Optimization Kerf Width and Surface Roughness in Wirecut Electrical Discharge Machining Using Brass Wire. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 37–55.
15. Maher I., Lingb L.H., Sarhan A.A.D. Improve wire EDM performance at different machining parameters – ANFIS modeling. *IFAC-Papers OnLine*, 2015, vol. 48-1, pp. 105–110. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.05.109.
16. Mu-Tian Yan, Yi-Peng Lai. Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, no. 47, pp. 1686–1694. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.01.006.
17. Abbas N.M., Solomon D.G., Bahari Md.F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, no. 47, pp. 1214–1228. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.
18. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Oglezneva S.A. Electrical Discharge Machining of Polymer Composites. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40, no. 10, pp. 878–879.
19. Ablyaz T.R., Muratov K.R., Shlykov E.S. et al. Electric-Discharge Machining of Polymer Composites. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 10, p. 898900.
20. Fukuzawa Y., Katougi H., Mohri N. et al. Machining properties of ceramics with an electric discharge machine. *Proceedings of the XII ISEM*, 1998, pp. 445–454.
21. Mohri N., Fukuzawa Y., Tani T. et al. Assisting electrode method for machining insulating ceramics. *Annals CIRP*, 1996, no. 45 (1), pp. 201–204.
22. 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.

23. Lauwers B., Kruth J.P., Liu W. et al. Investigation of Material Removal Mechanisms in EDM of Composite Ceramic Materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, no. 149, pp. 347–352.
24. Puertas I., Luis C. A Study on the Electrical Discharge Machining of Conductive Ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 153–154/1–3, pp. 1033–1038.
25. Kucukturk C., Çogun C. A New Method for Machining of Electrically Nonconductive Workpieces Using Electric Discharge. *Machining Technique, Machining Science and Technology*, 2010, vol. 14, pp. 189–207.
26. Hosel T., Müller C., Reinecke H. Simple Techniques of Spark Erosive Structuring of Electrically Nonconductive Zirconia (ZrO₂), 4M. *4M/ICOMM 2009. The Global Conference on Micro Manufacture*, 2009.
27. Wüthrich R., Fascio V. Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon – an overview. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1095–1098.
28. Schubert A., Zeidler H., Wolf N., Hackert M. Micro electro discharge machining of electrically nonconductive ceramics. *AIP Conference Proceedings*, 2011, pp. 1303–1308.
29. Snudde V., Boone M.N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 123, pp. 1–17.
30. Feldkamp L.A., Jesion G. 3-D X-ray computed tomography. *Review Progress Quantitative Non-destructive Evaluation*, 1986, vol. 5a, pp. 555–566.
31. Hanna R.D., Ketcham R.A. X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies. *Geochemistry*, 2017, vol. 77, is. 4, pp. 547–572.
32. Stock S.R., Sasov A., Liu X., Salmon P.L. Compensation of mechanical inaccuracies in micro-CT and nano-CT. *Developments in X-ray Tomography VI*. Washington, DC: SPIE, 2008. DOI: 10.1117/12.793212.

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 кафедрой, к.т.н., ФГАОУ ВО ПНИПУ, kanc@pstu.ru

Плотников Евгений Владимирович, аспирант, ФГАОУ ВО ПНИПУ, kanc@pstu.ru

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

Каменских Анна Александровна, доцент, к.т.н., ФГАОУ ВО ПНИПУ, kanc@pstu.ru

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

Пантелеев Иван Алексеевич, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., ИМСС УрО РАН, adm@icmm.ru

Мубassarова Виргиния Анатольевна, научный сотрудник, к.ф.-м.н., ИМСС УрО РАН, adm@icmm.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 V. Plotnikov, Graduate Student, FAEI HE PNRPU, kanc@pstu.ru

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

Anna A. Kamenskih, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), FAEI HE PNRPU, kanc@pstu.ru

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

Ivan A. Panteleev, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), ICMM UB of RAS, adm@icmm.ru

Virginia A. Mubassarova, Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), ICMM UB of RAS, adm@icmm.ru

Статья поступила в редакцию 25.10.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.11.2023.
The article was submitted 25.10.2023; approved and accepted for publication after reviewing 02.11.2023.