

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Бубнёнкова Богдана Борисовича на тему: «Разработка технологии селективного лазерного спекания тонкостенных и сложнопрофильных изделий из карбида кремния», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы» и состоявшейся в НИТУ МИСИС 14 октября 2026 года.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС (29.06.2026), протокол № 40.

Диссертация выполнена на кафедре металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов (МЗМ) НИТУ МИСИС Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Иванов Иван Алексеевич, научный руководитель передовой инженерной школы «Материаловедение, аддитивные и сквозные технологии» (ПИШ МАСТ), заместитель генерального директора АО «НПО «ЦНИИТМАШ» – директор Института металлургии и машиностроения (ИМиМ).

Экспертная комиссия утверждена диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 40 от 29.06.2026) в составе:

1. Левашов Евгений Александрович, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий (ПМиФП), директор Научно-учебного центра СВС МИСИС-ИСМАН (НУЦ СВС), НИТУ МИСИС – председатель комиссии.

2. Петржик Михаил Иванович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НУЦ СВС, профессор кафедры ПМиФП, НИТУ МИСИС.

3. Кирюханцев-Корнеев Филипп Владимирович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией «In situ диагностика структурных превращений» НУЦ СВС, профессор кафедры ПМиФП, НИТУ МИСИС.

4. Логинов Павел Александрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник отдела структурного анализа и метрологии, Институт нанотехнологии микроэлектроники РАН (ИНМЭ РАН).

5. Серов Михаил Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «1101 Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)».

В качестве ведущей организации утверждено акционерное общество «Композит», г. Королёв.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана научная концепция аддитивного формирования тонкостенных и сложнопрофильных изделий из карбида кремния, включающая селективное лазерное спекание (СЛС) и комплексную постобработку путем пропитки высокоуглеродсодержащим полимером, пиролиза и силицирования, позволившая выявить новые физико-химические закономерности формирования структуры и свойств карбидной керамики и получать изделия с плотностью до $3,05 \text{ г/см}^3$ и пористостью менее 0,2 %.

предложена, термодинамически обоснована и экспериментально подтверждена гипотеза об определяющей роли плотности энергетического воздействия лазерного излучения в процессе СЛС, способствующего спеканию порошка SiC и формированию сложнопрофильных и тонкостенных изделий, что позволяет управлять их плотностью в широком диапазоне (40-87%) и осуществлять аддитивное формирование изделий из неконгруэнтно плавящегося карбида кремния без введения спекающих добавок

доказана перспективность практического использования разработанной технологии для изготовления крупногабаритных (до 950 мм) сложнопрофильных изделий оптического назначения, что подтверждено изготовлением, испытанием макета охлаждаемого зеркала с развитой системой тонкостенных рёбер (толщина стенок до 1,5 мм, внутренние каналы до 0,7 мм) и созданием специализированной промышленной установки «MeltMaster3D-1000» с 8-лазерной системой сканирования, внедрённой в производство АО «НИИ НПО «ЛУЧ» Госкорпорации «Росатом».

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изложены доказательства того, что зависимость относительной плотности СЛС заготовок от плотности энергии лазерного излучения ($\lambda = 1070 \text{ нм}$) в интервале 60–150 Дж/мм³ носит экстремальный характер: при превышении плотности энергии более 100 Дж/мм³ происходит активное газовыделение в результате диссоциации SiC, препятствующее процессу спекания; максимальное значение плотности (87%) достигается при 90 Дж/мм³, что позволяет управлять плотностью изделий в диапазоне 40-87% и осуществлять аддитивное формирование изделий из неконгруэнтно плавящегося карбида кремния без введения спекающих добавок.

раскрыт механизм и установлены закономерности структуро- и фазообразования в процессе селективного лазерного спекания порошка карбида кремния в среде аргона под действием излучения иттербиевого лазера ($\lambda = 1070 \text{ нм}$) в интервале плотности энергии 60–

150 Дж/мм, заключающийся в диссоциации SiC в приповерхностном слое частиц с образованием двухслойной структуры: композитного расплава на основе кремния с включениями наночастиц графита и карбида кремния (верхний слой до 1 мкм), а также аморфного и кристаллического кремния с частицами графитизированного углерода (нижний подслой 3–5 мкм), что способствует увеличению межчастичных контактов и повышению плотности изделия.

выявлены условия и особенности формирования структуры карбидокремниевой керамики в процессе силицирования СЛС-заготовок, прошедших пироуглеродное уплотнение, заключающиеся в том, что наряду с пироуглеродом в качестве источника углерода для образования вторичной фазы реакционного SiC (SiCII) является также свободный углерод, формируемый в процессе СЛС в результате термической диссоциации SiC в поверхностном слое порошковых частиц при плотности энергии лазерного воздействия (80–100 Дж/мм³), что приводит к повышению суммарного содержания карбида кремния в керамике с 65-89 % до 93-100 %, плотности до 99,8 % и теплопроводности до 135 Вт/(м·К).

Применительно к проблематике диссертации результативно с получением обладающих новизной результатов **использован комплекс** аналитических методов исследования (растровая и просвечивающая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом, рентгенофазовый анализ, гидростатическое взвешивание, микрокомпьютерная томография, дифференциальная сканирующая калориметрия, лазерная вспышка), позволивший достоверно установить причинно-следственные связи между технологическими параметрами СЛС, эволюцией микроструктуры и фазового состава, а также теплофизическими и механическими свойствами получаемых изделий.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработаны и зарегистрированы технологические инструкции №006.002.11-0012-2022 «Селективное лазерное спекание карбидокремниевых материалов» и №013.010.11-0008-2024 «Изготовление макета целевого изделия с применением ОО установки СЛС», регламентирующие производственный процесс;

- созданная технология изготовления макета тонкостенного крупногабаритного изделия оптического назначения (диаметром 950 мм) зарегистрирована в ГНЦ АО «НПО «ЦНИИТМАШ» в виде ноу-хау (уведомление о создании РИД №112 от 25.10.2024, приказ № 234/342-П от 25.12.2024);

- на основе разработанных рекомендаций изготовлена и внедрена в производство АО «НИИ НПО «ЛУЧ» специализированная СЛС-установка «MeltMaster3D-1000» с

8-лазерной системой сканирования и рабочей зоной $1000 \times 1000 \times 300$ мм, что подтверждено актом о внедрении;

– разработанная технология селективного лазерного спекания с последующей постобработкой (PIP+LSI) обеспечивает получение изделий с теплопроводностью до 135 Вт/(м·К), прочностью на изгиб 320–360 МПа и на сжатие 2000–2200 МПа, что соответствует уровню свойств изделий, получаемых методом горячего прессования.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность научных положений и выводов обеспечена значительным объёмом экспериментальных данных, полученных с использованием современного аттестованного оборудования и взаимодополняющих методов анализа. Результаты обработаны статистически, теоретически интерпретированы с привлечением термодинамических расчётов и подтверждены сопоставлением с литературными данными. Воспроизводимость результатов и промышленное внедрение технологии свидетельствуют о надёжности выводов.

Личный вклад соискателя состоит в анализе литературных источников, постановке задач исследования, планировании и проведении лабораторных и опытно-промышленных экспериментов, обработке и интерпретации полученных данных, формулировании основных научных положений и выводов, подготовке публикаций и ноу-хау.

По результатам диссертационного исследования соискатель представил 2 статьи в журналах из перечня ВАК и входящих в базу данных Scopus, 5 тезисов докладов на международных конференциях и 1 ноу-хау.

Пункт 2.6 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Бубнёнкова Богдана Борисовича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней на основании выполненных автором исследований разработаны научно обоснованные технологические решения по получению тонкостенных и сложнопрофильных изделий из карбида кремния селективным лазерным спеканием и постобработкой (пироуглеродное уплотнение и силицирование), в том числе крупногабаритных (до 950 мм) изделий оптического назначения с толщиной стенок до 1,5 мм и внутренними каналами размером до 0,7 мм, что имеет важное значение для развития аддитивных технологий, получения изделий из керамических материалов и импортозамещения в области производства высокотехнологичных изделий оптического и теплообменного назначения.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Бубнёнку Боладу Борисовичу учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 4 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 4, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



Е.А. Левашов

14.10.2026