

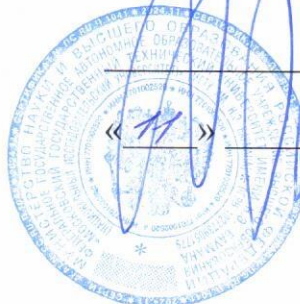
«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и цифровому
развитию

ФГАОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана

д.э.н. П.А. Дроговоз

2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

о диссертационной работе Евгенова Александра Геннадьевича на тему
«Научные основы структурообразования в процессе селективного лазерного
сплавления порошковых композиций жаропрочных никелевых и
интерметаллидных сплавов для деталей газотурбинных двигателей и
установок», представленную на соискание ученой степени доктора технических
наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение

Актуальность темы

Развитие авиационного двигателестроения на протяжении последних десятилетий неизбежно связано с повышением температуры газа на входе в турбину высокого давления, что может быть осуществлено двумя путями: применением все более жаропрочных сплавов или разработкой новых конструкций и принципов систем охлаждения вместе с применением теплозащитных покрытий. Первый путь имеет свои ограничения. Для сплавов на

никелевой основе резервы легирования к данному моменту практически исчерпаны. Второй путь с появлением так называемой 3D-печати металлических деталей получил свое новое развитие.

Аддитивные технологии вообще и технология селективного лазерного сплавления (СЛС) в частности применительно к авиационной технике представляют особый интерес. Послойный способ добавления материала, реализуемый при малых толщинах наносимого порошкового слоя открывает большие перспективы для новых принципов проектирования, реализации ранее невозможных схем и подходов для систем охлаждения деталей горячего тракта. Для относительно простых деталей камеры сгорания технология СЛС – это путь снижения трудоемкости при производстве деталей: за счет возможности синтеза цельного агрегатированного узла отпадает необходимость в пайке, сварке, клепке, что не только упрощает технологию производства, но и повышает надежность конструкции, соединения в которой всегда являются слабым местом, определяющим общий ресурс.

Однако проектирование требует наличия данных по механическим и физическим характеристикам в диапазоне рабочих температур материалов, получаемых по новым технологиям. Но применительно к технологии СЛС не только характеристик, но и самих отечественных оригинальных материалов, как и технологий синтеза из них ресурсных деталей не было. До постановки настоящей работы на территории России для изготовления деталей сборочных единиц для ГТД и ГТУ ограничено применялись или зарубежные порошковые материалы, или их прямые аналоги при обеспечении работы на стандартных технологических режимах зарубежного оборудования. Одно это обстоятельство уже является весомым фактором подтверждения актуальности диссертационной работы Евгенова А.Г., направленной на создании целой линейки отечественных жаропрочных и жаростойких материалов для технологии СЛС.

Разработка материалов и технологий производства из них ресурсных деталей не может быть выполнена без наличия полного материаловедческого базиса, адекватно описывающего процессы структурообразования, изменение

механических характеристик при различных воздействиях. Отсутствие таких сведений при отсутствии материалов закономерно, но и в глобальном смысле, не смотря на более чем два десятка лет исследований в данном направлении, процессы формирования металла при СЛС, включая тонкую структуру, текстуру, напряжения, содержат значительные белые пятна и неоднозначные толкования. Поэтому проведенные в диссертации исследования и сделанные автором теоретические заключения особенно важны и актуальны применительно к процессам структурообразования металлических материалов в технологии СЛС.

Вызывает одобрение и комплексный подход автора, посвятившего значительную часть диссертационной работы вопросам повторного применения оборотных порошков – неиспользованного материала в процессе сплавления деталей. Это направление является наименее исследованным, а впервые определенные автором закономерности и механизмы загрязнения порошков и самого СЛС-металл подтверждают актуальность проведенных исследований.

В целом актуальность диссертационной работы Евгенов А.Г. не вызывает сомнений, а дополнительно подтверждается выполнением ее разделов в рамках серии Государственных контрактов по развитию гражданской авиационной техники, а также мероприятий Минобрнауки РФ по поисковым и прикладным исследованиям.

Научная новизна исследования и полученных результатов

Для разработки научных основ структурообразования жаропрочных сплавов в процессе СЛС автором проведен всесторонний научный анализ технологического процесса, включая исследования структурных особенностей различных классов жаропрочных сплавов, связанных с высокоградиентной кристаллизацией при направленном теплоотводе и исключительной локальностью теплового воздействия, а также с применением исходного сырья в виде металлического порошка – материала с большой удельной поверхностью и высоким (в сравнении с литой заготовкой) содержанием газовых примесей.

Можно выделить основные, наиболее существенные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Для разработки отечественных жаропрочных материалов автором разработана физическая модель формирования тонкой структуры ванны расплава в процессе СЛС на базе сформулированного механизма стохастической бинаризации кристаллографической ориентировки кристаллитов. Предложенная модель вполне адекватно с позиций единых закономерностей объясняет обострение и нивелирование текстуры, изменения в процессе термической обработки размеров зерен в зависимости от исходных технологических параметров процесса СЛС, а также специфическое изменение уровня внутренних напряжений.
2. Автором установлено, что величина подводимой энергии, необходимой для получения плотного металла, обусловлена не легированием сплава, в частности содержанием тугоплавких элементов, а температурами плавления металлопорошковой композиции (солдус и ликвидус). Выявленная закономерность изложена в виде регрессионного уравнения, позволяющего рассчитать необходимую плотность энергии с вполне приемлемой на практике точностью.
3. Впервые сформулированы механизмы и закономерности загрязнения оборотных порошков и деградации синтезированных материалов. Установлена связь уровня загрязнения оборотных порошков с интенсивностью кипения ванны расплава при экспонировании сечений по различным режимам, что позволило сформулировать методику прогнозирования загрязнения оборотного порошка газовыми примесями. Научно обоснованы механизмы перекрестного и накопительного загрязнения, приводящие к деградации синтезированного металла при использовании оборотных порошков.
4. Разработана гамма отечественных жаропрочных материалов, включая жаростойкие ВЖ159-ПС и ЭП648-ПС с температурой эксплуатации до 1000 °С и ВЖ171-ПС с рабочей температурой до 1200 °С; литейные

ВЖЛ12У и ЖС6К и интерметаллидные ВКНА25Р, ВКНА4УР, ВКНА1В. Разработанные материалы применены для изготовления синтезированных деталей и заготовок для опытных и серийных изделий ведущих КБ авиационной отрасли (АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-ПМ», АО «ОДК-Климов»).

5. Впервые в отечественной практике на основе многолетних исследований выполнена классификация дефектов синтезированного материала, получаемого методом СЛС, реализованная в виде классификатора дефектов, содержащего описание дефектов, их кодификацию, вероятные причины возникновения и типичные изображения, полученные различными методами разрушающего и неразрушающего контроля.

Обоснованность и достоверность основных положений и результатов диссертации не вызывает сомнений.

Основу методологии исследований составили публикации, патенты и зарубежных и отечественных исследователей, подробный и обстоятельный анализ которых приведен в главе 1 диссертации. Основной объем экспериментов проведен на серийном зарубежном аддитивном оборудовании высокого уровня. Кроме того, достоверность основных положений и результатов обеспечена:

- применением комплекса современных методов исследования микроструктуры, химического состава, стандартизированных методик и современного испытательного оборудования для испытания механических характеристик;
- подкреплением выводов по процессам структурообразования помимо металлографических исследований результатами механических испытаний, в том числе и после длительных высокотемпературных воздействий на синтезированные материалы;
- подтверждением полученных экспериментальных данных при проведении паспортизации разработанных материалов со статистически значимыми выборками;

- внедрением разработанных материалов в конструкции опытных и серийных изделий двигателестроительных КБ.

Большое значение для науки и производства полученных автором результатов не вызывает сомнений.

Разработанная автором физическая модель кристаллизации ванны расплава имеет весомое значение для материаловедения. Очевидно, что она применима для материалов на различных основах и является логическим продолжением теоретических представлений о затвердевании металлических расплавов при классических способах литья. Установленные в работе закономерности влияния межтрекового расстояния и скорости экспонирования на формирование структуры, текстуры и внутренних напряжений в синтезированном металле использованы при разработке технологических процессов печати несвариваемых литейных и интерметаллидных сплавов, ранее считавшихся непригодными для технологии СЛС без использования систем высокотемпературного подогрева.

Диссертация написана технически грамотным языком, оформлена в соответствии с действующими нормативами. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию. Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня, рекомендованного ВАК для публикации материалов диссертационных работ, достаточно полно отражают основное содержание диссертации.

Вопросы и замечания по материалам диссертации:

1) В диссертации нет анализа или рекомендаций по универсальности или, наоборот, локальности выявленных закономерностей структурообразования в процессе СЛС для применяемого оборудования. Будут ли они действовать при переходе на отличную от выбранной в работе платформы зарубежного или отечественного оборудования? Справедливы ли они при

увеличении габарита построения, температуры подогрева плиты построения, диапазона мощности лазера?

2) Глава 4, посвященная исследованию влиянию применения оборотных порошков на свойства и структуру синтезированного материала и описывающая сразу несколько методик исследований и прогнозирования, не содержит в конце понятных рекомендаций или выводов по допустимому количеству вовлечения оборотного порошка при печати деталей ГТД и ГТУ, которым и посвящена работа.

3) До конца осталось не ясно, в чем состоит общность подходов диссертации если экспериментальные исследования проводились на вполне конкретном технологическом оборудовании фирмы EOS. На сколько корректными будут результаты при использовании аддитивных установок других производителей?

4) Вопрос того, как применять методические подходы, предложенные в диссертации, при переходе на другие сплавы остался не раскрыт. В частности, не ясно как в предложенной модели кристаллизации учтена вероятность возникновения дефектов, связанных с вязкостью расплава, который меняется от одного состава к другому.

5) В работе исследовано влияние содержания газовых примесей порошка на качество формируемого материала, однако, кроме газовых примесей есть и другие критические важные параметры, в частности гранулометрические характеристики, сыпучесть. Хотелось бы разобраться были ли выявлены границы параметров порошков, нарушение которых делает невозможным получение качественного материала.

6) В диссертации присутствуют опечатки и несогласованные предложения.

Указанные замечания не меняют общего положительного впечатления о диссертации. В целом диссертационная работа Евгенова А.Г. выполнена на высоком научном уровне, а ее результаты получили весьма широкое внедрение на предприятиях авиационного двигателестроения.

Разработанные в диссертации физическую модель кристаллизации, механизмы загрязнения оборотных порошков и деградации синтезированного материала можно рекомендовать к использованию и дальнейшему развитию в научно-исследовательских организациях, занимающихся исследованием, разработкой и применением технологий и материалов послойного синтеза металлических материалов, и технологии СЛС в частности: НИТУ МИСИС, СПбПУ, АО «Композит», ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова и других.

Заключение

В диссертационной работе А.Г. Евгенова на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение. Представлены новые научно обоснованные механизмы, методики, технологические решения, на базе которых созданы новые жаропрочные материалы на основе никеля и интерметаллида Ni_3Al для технологического процесса селективного лазерного сплавления.

Разработанные технологии, материалы, методики и большой объем нормативной документации внедрены на предприятиях авиационного двигателестроения, для производства деталей горячего тракта газотурбинных двигателей и газотурбинных установок, обеспечивая тем самым развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности.

Диссертационная работа отвечает требованиям п.9 Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней (утверждено Правительством Российской Федерации от 24.09.2013г., № 842), а ее автор Евгенов Александр Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

Доклад по диссертационной работе заслушан на заседании кафедры СМ12 «Технологии ракетно-космического машиностроения», протокол №04.63-04/4 от 11.11.2025. В обсуждении работы принимали участие ведущие профессора, доктора технических наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский

государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». За предложенное заключение участники заседания проголосовали единогласно.

Заведующий кафедры СМ12

«Технологии ракетно-космического
машиностроения»

Доктор техн. наук, профессор

Галиновский А.Л.

