

ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы 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»**, представленной на соискание
ученой степени доктора технических наук

Применение новых технологических процессов в промышленности всегда имеет в основе стадию первичного накопления знаний, сопряжено с необходимостью проведения большого объема исследований, испытаний. Результатом этой стадии должно являться формирование научной основы внедрения процесса, обеспечивающей понимание поведения и особенностей получаемого материала в зависимости от технологических переделов. Аддитивные технологии, и конкретно технология селективного лазерного сплавления (СЛС), как наиболее новое и востребованное направление в технике за последние десятилетия, к настоящему моменту сохраняют достаточно «белых пятен» в части физики процесса, исследования жизненного цикла материалов.

Выполненный диссертантом обширный анализ научно-технической литературы по всем основным аспектам применения технологии СЛС и создания для нее материалов (список литературы составляет 283 источника) позволил диссертанту сформулировать наиболее актуальные задачи, выявить проблемные, малоизученные аспекты технологии. По результатам анализа литературных данных автор выделяет три ключевых и взаимосвязанных направления исследований: исследования в части формирования структуры и текстуры получаемых методом СЛС материалов, перевод существующих и, при необходимости, разработка новых материалов под данную технологию, и направление, связанное с повторным применением порошка, задействованного в процессе печати деталей, но непосредственно не затронутого лазерным излучением. Комплексный подход в постановке задач исследования позволил автору показать в работе весьма стройную систему перехода от теоретических изысканий к практическому созданию материалов и технологий, определить основные теоретические закономерности и механизмы, создав на их основе процессы и методики вполне практического приложения.

Постановка задач исследований в теоретической части решена автором в полемическом ключе рассмотрения результатов работ зарубежных и российских исследователей и выявления в них несоответствий и недостаточно исследованных моментов. В результате анализа зарубежного опыта, автор, суммируя его, ставит серию показательных экспериментов, которые позволили сформулировать ключевые материаловедческие положения применительно к технологии СЛС: механизма формирования тонкой структуры дорожек кристаллизации, сохранения плотности энергии при многократном увеличении скорости сканирования, установление корреляционной связи потребной плотности энергии с интервалом кристаллизации сплавов.

При этом, можно отдельно отметить не только имеющееся в работе экспериментальное подтверждение теоретических выкладок в части предложенного автором механизма стохастической бинаризации кристаллографической ориентации кристаллитов, но и применение этого механизма для вполне логичного объяснения причин формирования отмечаемых в зарубежных исследованиях специфических текстур, формирующихся в процессе СЛС, которым сами авторы не дали исчерпывающих объяснений. Выявленные закономерности кристаллизации ванны расплава использованы автором и в практическом плане: научно обоснован выбор параметров СЛС для печати литейных материалов, для создания (наведения) обостренной кристаллографической текстуры.

Ключевым моментом теоретической части исследования является впервые установленная и экспериментально подтвержденная автором связь плотности энергии сплавления с интервалом плавления порошковых материалов на никелевой и кобальтовой основе, обеспечивающая возможность непосредственного расчета плотности энергии для начала отработки режима сплавления. В практическом плане, очевидно, отработка режима штриховки «ядра» или основного металла является не самой трудоемкой задачей, но вот в теоретическом плане установление такой зависимости является безусловным шагом вперед по сравнению с «поисками технологического окна», часто встречающимися в зарубежных источниках и требующими большого объема трудоемких металлографических исследований. Вкупе с научно обоснованным выбором величины межтрекового расстояния, также рассмотренным в диссертационной работе, сам процесс поиска оптимального режима штриховки «ядра» детали может, действительно, быть решен буквально за один старт при минимальном количестве образцов для металлографического контроля.

Практическая часть разработки отечественных жаропрочных материалов для технологии СЛС совмещена с большим объемом материаловедческих исследований: для выбранных материалов не просто отработаны режимы печати (на что автором, как раз упора не делается), а проведены комплексные исследования особенностей синтезированных материалов, их отличий от классических аналогов из-за изменения технологии получения. Рассмотрены ключевые изменения микроструктуры, показаны причины дестабилизации системы легирования классического материала при переходе на технологию СЛС, реализованы корректирующие меры (изменение легирования по хрому для сплава ВЖ159). Для исследованных жаростойких сплавов (ЭП648, ВЖ159, ВЖ171) приведен весьма ценный в части металловедения большой объем структурных исследований, выполненных на высоком научном уровне с привлечением тонких методов исследования, включая ПЭМ прямого разрешения. Данных по классическим вариантам этих материалов в открытой печати крайне мало. Сам выбор данных материалов надо признать весьма удачным, что подтверждается приведенными данными по внедрению в изделия передовых отечественных двигателестроительных КБ. Разработанная автором гамма жаростойких материалов имеет значительные преимущества по сравнению с зарубежными аналогами, главным из которых, безусловно, является значительно более высокая рабочая температура.

Большое научно-практическое значение имеют работы по исследованию влияния применения при печати повторно используемых порошков. Научно доказана и экспериментально подтверждена деградация оборотных порошков при повторном использовании, выбраны адекватные критерии оценки степени деградации. Автором установлены механизмы загрязнения не только повторно используемых порошков, но и самого «напечатанного» металла: как в накопительном ключе, так и *in-situ*, при первой печати (при перекрестном загрязнении). Показано, что загрязнение выражается в попадании в структуру металла частиц оксидов алюминия или оксидов хрома в зависимости от плотности расстановки на платформе, последнее приводит к интенсивному снижению длительной прочности и пластичности металла. При загрязнении округлыми частицами Al_2O_3 снижение механических характеристик сказывается скорее на появлении отдельных выпадов, чем на общем уровне свойств. Данные механизмы установлены автором впервые и имеют большое практическое значение для понимания влияния размещения печатаемых деталей и их количества на плите построения. Евгеновым А.Г. предложены сразу две оригинальных методики оценки загрязнения оборотных порошков: расчетная, с предварительным определением коэффициентов увеличения содержания кислорода в зависимости от

плотности энергии штриховки основного металла, контуров и поверхностей, а также зональности загрязнения порошка и синтезированного металла по зонам платформы построения с применением специально сконструированных образцов. Предложенные методики, как и результаты структурных исследований являются оригинальными, а большой объем проведенных механических испытаний полученного металла подтверждает их адекватность.

По результатам диссертации выпущен целый ряд нормативной документации на технологические процессы, а также, впервые, технические условия. Разработаны классификатор дефектов и методика оценки деградации повторно используемых порошков.

Результаты работы прошли широкую апробацию на различных конференциях, получили одобрение ведущих специалистов. Содержание работ представлено в 28 публикациях в журналах списка ВАК (большая часть опубликована в переводных изданиях), а также в 3 патентах РФ.

Несмотря на полное достижение целей квалификационной работы, каковой является данная законченная диссертация, выполненные исследования и разработки открывают широкий простор для новых продуктивных исследований и внедрений в производство новых технологических процессов как для самого автора, так и для других исследователей в данной области.

По автореферату есть замечания, не умаляющие высокого достоинства работы:

- 1) Описание содержания второй главы начинается со слов «посвящена исследованиям в части теории кристаллизации трека...», однако сам термин, не будучи общеупотребимым, не раскрывается. Понять, что речь идет о кристаллизованной ванне расплава можно лишь из логики дальнейшего изложения;
- 2) В главе 2, в изложении анализа «условий формирования ячеистой структуры...» напрашивается более подробное объяснение физики процесса кристаллизации, т.к. это ключевой и фундаментальный вопрос всей работы, особенно, ввиду отсутствия упоминания современных исследований в части описания зависимости свободной энергии системы от поверхностей раздела расплав / кристалл и энергии образования и роста зародыша. Также не полностью раскрыт вопрос смачиваемости, особенно в контексте её изменения в зависимости от температуры системы жидкость / поверхность раздела / кристаллизованный металл. Можно рекомендовать эти

направления как рекомендации для углубленного дальнейшего исследования соискателя.

Считаю, что диссертационная работа безусловно актуальна, неоспорима ее научно-практическая ценность, а ее автор, Евгенов Александр Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17 Материаловедение.

Советник вице-президента Российской академии наук
Аппарата руководства РАН,
проф., д.т.н.



И.Е.Ковалев

Ковалев Игорь Евгеньевич
Аппарат руководства РАН
119991, Москва, Ленинский проспект, 14
Тел. +7(495) 938-02-00 доб.1032
E-mail: iekovalev@pran.ru
Профессор, доктор технических наук
Шифр научной специальности: 2.6.4 - Обработка металлов давлением.

