ОТЗЫВ

на диссертационную работу Рыжкова Петра Валерьевича
«Усталостная долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

Диссертационная работа П.В. Рыжкова посвящена установлению закономерностей влияния структурного состояния и состояния поверхностного слоя образцов на усталостную долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления, и разработке методов её прогнозирования.

Актуальность работы определяется расширением применения аддитивных технологий при изготовлении сложнопрофильных деталей авиационных двигателей и энергетических установок. При этом применяемые методики испытаний статической и усталостной прочности предполагают оценку только «основного» металла без учета влияния поверхностного рельефа, который для реальных напечатанных деталей часто сохраняется (по крайней мере, частично) и в процессе эксплуатации. Важное значение для технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) имеет и наличие приповерхностных дефектов, поскольку сами поверхностные элементы формируются по режимам и алгоритмам, отличным от основного металла. Применение оборотных порошков и связанное с этим вовлечение в рабочую фракцию порошка окисленных частиц также может способствовать появлению приповерхностных дефектов из-за нарушения условий смачиваемости расплавом монолитного металла. По многочисленным исследованиям литейных жаропрочных сплавов известно, что такие дефекты не сказываются на статической и длительной прочности. Однако их наличие способно оказать серьезное влияние на характеристики циклической прочности материала, ограничивать циклический ресурс даже при удовлетворительных характеристиках кратковременной и длительной прочности. Особенно существенна эта проблема для тонкостенных элементов и внутренних поверхностей, механическая обработка которых затруднена или вовсе невозможна. Более того, тонкостенные элементы при печати методом СЛС могут состоять из материала, режим формирования которого отличен от основного металла, который испытывается при классическом подходе на механически обработанных (шлифованных, полированных) образцах. Из вышесказанного очевидно, что установление связи между условиями

формирования поверхностного слоя и усталостным разрушением сплава ВЖ159 представляет научный и практический интерес.

Достоинством работы является комлексный подход соискателя, связывающий большой объем структурных исследований, механических испытаний, фрактографического анализа с численным моделированием. Получаемая в процессе СЛС поверхность печатаемого изделия рассматривается автором как совокупное действие режимов экспонирования, пространственной ориентации поверхности и условий кристаллизации треков (ванн расплава), формирующих поверхность. Такой подход позволяет связать особенности изготовления образцов с локальными условиями зарождения усталостных трещин. Удачным также надо признать сам термин – технологическая шероховатость, – подчеркивающий ее связь с параметрами технологического процесса, включая сюда и ориентацию детали в процессе построения.

В работе исследованы особенности формирования верхних и нижних наклонных поверхностей, показано влияние высокоэнергетического контура на качество поверхностного слоя. Выявлены приповерхностная газовая пористость и мелкозернистый слой, отличающийся от основного объёма материала. Существенно, что роль этих особенностей рассмотрена с учётом результатов испытаний и анализа очагов разрушения, а не только по данным металлографического исследования.

Научный интерес представляет сопоставление поведения материала при различных видах нагружения. Показано, что влияние исходной технологической поверхности на циклическую долговечность при температуре 650 °C отличается от её влияния на длительную прочность при температурах 800 и 1000 °C. Это подчёркивает необходимость самостоятельной оценки усталостных характеристик СЛС-материала и ограничивает возможность прогнозирования ресурса детали исключительно по результатам статических испытаний.

Основным расчётным результатом является двухстадийная методика прогнозирования долговечности, объединяющая оценку зарождения трещины по критерию Смита–Уотсона–Топпера и расчёт её последующего роста с использованием J-интеграла и кинетической зависимости Пэриса. Для описания локального циклического деформирования выполнена идентификация параметров упругопластической модели с комбинированным изотропным и кинематическим упрочнением. Применение такой схемы обосновано наличием выраженной стадийности усталостного разрушения, подтверждённой по результатам фрактографических исследований.

К положительным сторонам работы следует отнести проверку расчётных подходов на образцах с различными концентраторами напряжений и состояниями поверхности, а также рассмотрение реальных и моделируемых профилей шероховатости. Сопоставление расчётной долговечности с экспериментом и анализом изломов повышает адекватность предложенной методики. Большой объем исследований, использование взаимодополняющих методов и согласованность полученных результатов позволяют считать основные выводы работы обоснованными.

Практическая ценность результатов заключается в возможности использовать полученные закономерности при выборе режимов формирования поверхностного слоя, оценке необходимости последующей обработки поверхностей, а также возможности применения расчётного анализа усталостной долговечности элементов из сплава ВЖ159. Предложенная методика представляет интерес для предприятий, осваивающих производство деталей методом селективного лазерного сплавления, поскольку связывает контролируемые характеристики поверхности с оценкой локального повреждения материала.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Влияние технологической шероховатости, приповерхностной газовой пористости и мелкозернистого слоя рассматривается в совокупности. Вместе с тем указанные факторы могут по-разному влиять на зарождение и распространение коротких трещин. Было бы полезно более чётко разграничить экспериментально установленный вклад каждого фактора и его предполагаемую роль, а также пояснить, какие характеристики пористости и структуры необходимо контролировать наряду с параметрами шероховатости при практическом применении модели.

2. Вывод о пороговом угле наклона поверхности около 55° имеет сугубо практическое значение для конкретного примененного режима экспонирования. При изменении режима экспонирования (плотности подводимой энергии), он, очевидно, вполне может измениться. Данный момент требует более явного указания технологических границ применимости.

3. Параметры модели определены для исследованного структурного состояния сплава. Целесообразно подробнее сформулировать условия их применения к материалу, полученному с применением оборотных порошков с различной степенью деградации и, соответственно, изменением объемной доли, локализации и морфологии несплошностей. Однако данное замечание

скорее является перспективным направлением для продолжения исследований соискателя в данном направлении.

Указанные замечания имеют уточняющий и рекомендательный характер, обозначают направления дальнейшего развития предложенного подхода и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в полной мере в ведущих профильных российских периодических изданиях, входящих в список ВАК.

Диссертация П.В. Рыжкова является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена задача установления закономерностей усталостного разрушения жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления, и разработана методика прогнозирования долговечности с учётом состояния поверхности испытуемых образцов. Работа обладает научной новизной и практической значимостью, соответствует специальности 2.6.17. Материаловедение и требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Её автор, Рыжков Петр Валерьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Советник генерального
директора по науке, д.т.н. А.Г. Евгенов

15.10.2026г.

Акционерное общество «Центр аддитивных технологий»,
г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Покровское-Стрешнево, ул. Вишневая, д.7, стр.18

Евгенов Александр Геннадьевич, доктор технических наук, советник генерального директора по науке

Телефон +7 (495) 197-76-50

Электронная почта: info@rt-3d.ru

Евгенов А.Г. работает в АО «АТ» с 14.05.2025 г. Приказ от 14.05.2025 г. № 26-ПР в должности советник генерального директора по науке по настоящее время.

и.о. начальника отдела управления персоналом А.Г. Извекина 20.10.2026 г.