

В диссертационный совет 24.2.312.12 на  
базе федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Казанский национальный  
исследовательский технологический  
университет»,  
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

## **ОТЗЫВ**

**на автореферат диссертации Шварца Ивана Валерьевича  
«Структура и свойства материалов на основе нержавеющей стали и  
никелевого сплава, получаемых лазерно-аддитивным методом  
с ультразвуковым воздействием», представленной на соискание учёной  
степени кандидата технических наук по специальности  
2.6.17. Материаловедение**

Диссертационное исследование Шварца И.В. посвящено решению одной из актуальных проблем современного материаловедения и аддитивных технологий – управлению структурой и свойствами металлических сплавов в процессе их лазерного синтеза. Широкое внедрение лазерно-аддитивных методов в машиностроение сдерживается наличием типичных дефектов, которые существенно снижают эксплуатационную надежность изделий. В связи с этим особую значимость приобретают комбинированные технологии, позволяющие активно воздействовать на процесс кристаллизации жидкой ванны расплава. Одним из наиболее перспективных, но недостаточно изученных направлений является введение ультразвуковых колебаний непосредственно в зону лазерного нагрева. Несмотря на отдельные работы в этой области, остаются открытыми вопросы о влиянии частоты и мощности ультразвука на фазовый состав, морфологию дендритов, геометрию ванны расплава, а также на комплекс механических и трибологических свойств для широкого круга сплавов, включая функционально-градиентные материалы. Диссертация, выполненная в рамках государственного задания и при поддержке Российского научного фонда, а также по хоздоговору с РФЯЦ-ВНИИЭФ, направлена на систематическое решение этих задач. Таким образом, тема работы, связанная с разработкой научно-технологических основ лазерно-акустического производства и установлением закономерностей формирования структуры и свойств нержавеющей и никелевых сплавов, является своевременной, востребованной как фундаментальной наукой, так и промышленностью.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Применительно к лазерной точечной обработке нержавеющей сплава марки AISI 316L установлено, что ультразвуковое воздействие частотой 40 кГц и мощностью 100 Вт способствует увеличению микротвердости ванны расплава на 12–15% вследствие формирования мелкозернистой аустенитно-ферритной структуры. С использованием разработанной методики количественно подтверждено возрастание содержания  $\chi$ -фазы (включающей  $\delta$ -феррит) на 48–52%, а также выявлено изменение геометрии ванны расплава: увеличение площади поверхности до 15% и площади поперечного сечения до 90%.

2. Для процесса прямого лазерного выращивания нержавеющей сплава марки EuTroLoy 16316D.04 доказано, что ультразвуковое воздействие (22 кГц, 100 Вт) обеспечивает повышение микротвердости зоны наплавленного металла на 12,7%, прочности при статическом растяжении на 10,2% и износостойкости на 26,3% за счет формирования мелкозернистой дендритной структуры. Разработанная автором методика количественной оценки позволила зафиксировать уменьшение среднего размера столбчатых дендритов на 22–43% и снижение среднеквадратического отклонения их размеров на 38–65%, что свидетельствует о более равномерной микроструктуре полученного сплава.

3. При исследовании жаропрочного никелевого сплава марки Inconel 625, полученного методом прямого лазерного выращивания, экспериментально показано, что ультразвуковое воздействие (22 кГц, 100 Вт) приводит к увеличению микротвердости зоны наплавленного металла на 11,1% в результате перехода от столбчатой к мелкозернистой равноосной дендритной структуре.

4. При синтезе функционально-градиентного материала на основе металлопорошковых композиций из сплавов марки EuTroLoy 16316D.04 и марки Inconel 625 методом прямого лазерного выращивания установлено, что ультразвуковое воздействие (22 кГц, 100 Вт) обеспечивает увеличение микротвердости на каждом структурном слое в диапазоне 10,5–14,8% и сглаживание перепадов относительной интенсивности химических элементов Fe и Ni в пределах 10–12% при переходе от одного слоя к другому, что свидетельствует о более однородном распределении легирующих элементов.

Теоретическая ценность работы заключается в установлении фундаментальных закономерностей влияния ультразвукового воздействия различной частоты (22 и 40 кГц) и мощности (100 Вт) на процессы структурообразования в сплавах при лазерной точечной обработке и прямом

лазерном выращивании. В результате проведённых исследований выявлены и количественно охарактеризованы следующие зависимости:

- изменение фазового состава микроструктуры (соотношение аустенита и ферритной составляющей) от параметров ультразвуковых колебаний;
- трансформация морфологии дендритных кристаллов (переход от столбчатой к равноосной ячеистой структуре) и уменьшение статистического разброса их размеров;
- связь между геометрическими параметрами ванны расплава (площадь поверхности, площадь поперечного сечения) и режимами ультразвуковой обработки;
- влияние ультразвука на распределение легирующих элементов (Fe, Ni) в функционально-градиентных материалах и сглаживание концентрационных перепадов.
- Полученные данные развивают теоретические представления о механизмах акустической стимуляции кристаллизации и массопереноса в жидкой фазе металлов под действием лазерного излучения.

Практическая ценность работы подтверждена совокупностью конкретных разработок и их внедрением:

1. Создание экспериментального оборудования – разработаны и изготовлены стенды для лазерной точечной обработки и прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием, обеспечивающие эффективную передачу колебаний от излучателей Ланжевена к обрабатываемой заготовке.

2. Разработка оригинальных программных средств – созданы и зарегистрированы три программы для ЭВМ, позволяющие в автоматизированном режиме выполнять количественный анализ:

- измерение площади поверхности и поперечного сечения ванны расплава;
- определение процентного содержания фазовых составляющих микроструктуры;
- оценку распределения размеров столбчатых дендритов с построением гистограмм и вычислением статистических параметров.

Эти методики могут быть использованы в научно-исследовательских лабораториях и на производстве для объективного контроля качества.

3. Внедрение результатов:

- в учебный процесс ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» при изучении дисциплин «Лазерные акустические технологии» и «Материаловедение и технологии материалов»;

– в ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики».

Представленные в работе результаты можно считать вполне достоверными и всесторонне обоснованными, поскольку они получены с использованием современного сертифицированного оборудования, стандартизованных и оригинальных методик, включая авторские программные средства для количественного анализа. Корректность экспериментальных данных подкреплена статистической обработкой, отсутствием противоречий с известными теоретико-экспериментальными работами, а также положительными отзывами при обсуждении на конференциях и публикацией в изданиях, индексируемых в российских и международных базах цитирования. Всего по теме диссертационного исследования автором опубликовано 16 работ.

Автореферат написан грамотным научным языком, материал изложен последовательно и логично. Работа хорошо структурирована, а использование качественных иллюстраций (микрофотографий, гистограмм, схем установок) делает её содержание наглядным и доступным для восприятия. Важно отметить, что содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации и в полном объёме передаёт её основные научные результаты и защищаемые положения.

Замечания к автореферату:

- 1) Использовалась ли защитная атмосфера (аргон, гелий) при ЛТО и ПЛВ? Это критично для предотвращения окисления, особенно для никелевых сплавов.
- 2) Не указана погрешность измерения микротвердости (стандартное отклонение для каждой зоны). Приведены только средние значения и относительные разности.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Шварца И.В. является полностью завершённым научным трудом, содержащим системное решение научно-практической проблемы, связанной с созданием комбинированной лазерно-акустической технологии и установлением закономерностей формирования структуры и свойств материалов при таком воздействии. Поставленные автором задачи решены в полном объёме, полученные результаты обладают внутренним единством и практической ценностью.

Диссертационная работа Шварца Ивана Валерьевича «Структура и свойства материалов на основе нержавеющей сталей и никелевого сплава, получаемых лазерно-аддитивным методом с ультразвуковым воздействием»

