

УДК 669.018.44:669.715

И.С. Мазалов¹, А.Г. Евгенов¹, С.М. Прагер¹**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО
СТРУКТУРНО-СТАБИЛЬНОГО СПЛАВА ВЖ159
ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-3-7

Рассмотрены особенности микроструктуры синтезированного методом селективного лазерного сплавления жаропрочного никелевого сплава ВЖ159. Показано, что данный сплав благодаря своей высокой свариваемости позволяет сформировать более качественную микроструктуру деталей по сравнению с аналогичными сплавами. Горячее изостатическое прессование и последующая термообработка устраняют анизотропию механических свойств в синтезированных образцах.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, селективное лазерное сплавление, трековая структура, горячее изостатическое прессование.

The microstructure features of VZh159 Ni-base superalloy synthesized by selective laser melting are reviewed in the article. It is shown that due to its high weldability this alloy forms better microstructure in comparison with similar alloys. Hot isostatic pressing and following heat treatment eliminate the anisotropy of the mechanical properties in synthesized specimens.

Keywords: Ni-base superalloy, selective laser melting, track structure, hot isostatic pressing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Работа выполнена в рамках реализации научного направления 10.4. «Технологии получения би- и полиметаллических естественноармированных металлических материалов методом прямого лазерного синтеза из металлических порошков («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Традиционным путем совершенствования жаропрочных материалов для деталей статора, работающих при высоких температурах в среде сгорания топливовоздушной смеси, является легирование их никель-хромовой основы тугоплавкими элементами [2]. Сплавы этого класса принято классифицировать как гомогенные из-за отсутствия выделения упрочняющих фаз, когерентных аустенитной матрице. Несмотря на отличную свариваемость и технологичность, такие сплавы, ввиду невысоких характеристик прочности и сопротивления ползучести (при средних рабочих температурах), наряду с высокой плотностью, не являются оптимальными материалами для применения в силовых элементах крепления жаровой трубы к наружному корпусу. Детали камеры сгорания, такие как диффузор и опорное кольцо жаровой трубы с фланцем крепления к сопловому аппарату турбины, могут иметь значительные

габариты и, следовательно, массу. С целью повышения удельной весовой эффективности материалов для высокотемпературных зон камеры сгорания, наряду с требованиями стойкости к окислению в условиях сгорания топлива и для обеспечения предельной рабочей температуры 1000°C, разработан и до настоящего времени широко применяется жаропрочный сплав ЭП648 (ВХ4А) и его литейная модификация ВХ4Л.

Ограниченное содержание алюминия, титана и ниобия обеспечивает упрочнение сплава с выделением 8–10% γ' -фазы. Кроме того, высокое содержание хрома, а также легирование молибденом и вольфрамом обуславливает выделение избыточных фаз при старении – α -Cr и σ . Сплав ЭП648 относят к классу слабостареющих жаропрочных никелевых сплавов, так как выдержка в интервале температур распада твердого раствора (600–850°C) не приводит к выделению существенной доли дисперсных фаз, что позволяет сохранить пластичность и свариваемость на относительно высоком уровне. Данный материал нашел применение в конструкциях камер сгорания не только в виде раскатных колец для фланцев и листового проката для тонкостенных обечаек, но и как литейный сплав стойкий к окислению, предназначенный для изготовления диффузоров, завихрителей фронтальных устройств и элементов форсажных камер.

Опыт применения сплава ЭП648 показал, что, несмотря на хорошие показатели прочности, технологической пластичности и свариваемости, данный материал имеет ряд серьезных недостатков, существенно ограничивающих ресурс изделий. Высокое содержание хрома, как оказалось, не дает существенного повышения жаростойкости свыше 1000°C, по сравнению с гомогенными сплавами, содержание хрома в которых ограничено 20–25%. Вместе с тем в процессе наработки избыточные фазы на основе хрома, упрочняющие сплав, склонны к вырождению в игольчатую или пластинчатую структуру. Кроме того, вследствие нестабильности твердого раствора, сплав склонен к дополнительному выделению в процессе эксплуатации нежелательных ТПУ фаз: σ , μ и Лавеса низкопластичной морфологии, что приводит к резкому падению механических свойств – прежде всего пластичности и жаропрочности, что грозит разрушением изделия в процессе работы.

В ВИАМ разработан слабостареющий сплав ВЖ159 для замены серийного материала ЭП648 и его модификации ВХ4Л. При разработке особое внимание уделялось сбалансированному легированию по критерию допустимого числа электронных вакансий с целью снижения склонности к выделению ТПУ фаз. В сплаве ВЖ159 содержание хрома снижено с 33 до 28% (по массе), а упрочнение реализуется за счет наличия 10–12% γ' -фазы, содержащей ниобий, а также различных карбидов (M_3C , $M_{23}C_6$) на основе ниобия и хрома в сочетании с молибденом. Фазовые составляющие сплава ВЖ159 не склонны к вырождению в частицы с нежелательной морфологией структуры, благодаря чему пластические характеристики в диапазоне температур эксплуатации, в том числе при длительных выдержках, остаются на высоком уровне. Такие свойства материала позволяют называть его структурно-стабильным.

Наиболее известные и широко применяемые за рубежом слабостареющие сплавы – Inconel 625, Haynes 263. Их максимальная рабочая температура ограничена 900°C. Уровень длительной и кратковременной прочности сплава Inconel 625 снижен ввиду режима термообработки, не предусматривающего старения. Характеристики жаропрочности сплава Haynes 263 существенно ниже, чем у сплава ВЖ159 в связи с более ограниченным легированием элементами, образующими γ' -фазу.

Прочность сплава ВЖ159 на 10–15% превышает прочность сплава ЭП648, не уступает ему по жаропрочности, а по жаростойкости и термостойкости значительно превосходит серийный материал. Сплав ВЖ159 – материал, сварка которого возможна в термоупрочненном состоянии, что обуславливает широкое применение и ремонтпригодность данного материала. Сплав ВЖ159 широко освоен в промышленности в виде деформируемых полуфабрикатов – листового проката,

прутков, раскатных колец, поковок. Его применение в авиационной промышленности долгое время ограничивалось по причине отсутствия литейной модификации, необходимой для производства небольших деталей, получение которых механической обработкой из деформированной заготовки нецелесообразно или невозможно из-за наличия сложных внутренних полостей. Такие детали, как корпуса форсунок, завихрители, арматура систем подачи топлива и отбора воздуха на корпусе камеры сгорания, элементы жаровой трубы, как правило, в целях улучшения свариваемости получают отливкой из жаропрочного сплава той же марки, что и узлы корпуса или жаровой трубы, и соединяют их аргоно-дуговой сваркой. В настоящее время активно развивающаяся в ВИАМ технология аддитивного производства деталей из порошков жаропрочных сплавов, в том числе из сплава ВЖ159, позволяет существенно сократить время и трудоемкость изготовления таких деталей по сравнению с литейным производством [3, 4]. Наряду с этим фактором, комплекс механических характеристик синтезированных из порошка сплава ВЖ159 методом селективного лазерного сплавления (СЛС) деталей существенно превосходит уровень литого материала с равноосной структурой, достигая значений прочности деформированных полуфабрикатов.

Материалы и методы

Для изготовления порошка получали слитки жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 методом вакуумно-индукционной выплавки. Из заготовок слитков получали порошок методом атомизации (распыления расплава потоком аргона) на установке HERMIGA 10/100 VI. Гранулометрический состав порошка 10–50 мкм. Рассев порошка проводили в промышленном виброгрохоте ConceptLaser QM Powder. Отделение тонкой фракции (<10 мкм) осуществляли на газодинамическом сепараторе (классификаторе) установки HERMIGA 10/100 VI. Более подробно данные по получению отечественного порошкового материала приведены в работе [5].

Процесс СЛС порошка проводили в установке ConceptLaser M2 Cusing в среде азота, вырабатываемого штатным генератором Midigas 2 фирмы ConceptLaser. Подробно данные по характеристикам установки и описание применяемой стратегии сканирования приведены в работах [6, 7].

Газостатическую обработку (ГИП – горячее изостатическое прессование) осуществляли в газостате «Квинтус-16» фирмы ASEA (Швеция), оборудованном молибденовым нагревателем. Образцы без газостатирования испытывали в сыром виде и после полной термической обработки (ПТО), состоящей из закалки и старения по разработанному режиму; образцы после ГИП подвергали только старению.

Микроструктурный анализ проводили на растворяемом электронном микроскопе JSM 6480LV фирмы Jeol, оптическом металлографическом комплексе Olympus GX51 после электрохимического травления поверхности шлифов в растворе бихромата калия в ортофосфорной кислоте, а также методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе Теспаи G2 F20 S-TWIN TMR с ускоряющим напряжением 200 кВ. Образцы для исследований – тонкие фольги, полученные методом струйной полировки в спиртовом электролите на установке Tenipol 5 фирмы Struers. Исследования микроструктуры проводили с применением дифракционных, темнопольных и слабопучковых методов. Заготовки образцов для испытаний выращивали с ориентацией роста слоев по вертикали и горизонтали. Синтезированные заготовки механически обрабатывали с получением стандартных образцов для испытаний на кратковременную прочность по ГОСТ 1497–84 и длительную прочность по ГОСТ 10145–81 [8, 9].

Результаты и обсуждение

В процессе СЛС штриховка сечения происходит отдельными дорожками – треками, поперечный разрез которых имеет форму рыбьей чешуи, что связано с гауссовским распределением энергии иттербиевого лазера [10]. Такая структура является типичной для металлических материалов, полученных по технологии СЛС. В объеме треков формируются ячейки, объединенные в субзерна. Ориентация субзерен определяется конкурентным движением фронтов кристаллизации: вдоль оси трека (по ходу лазера) и в поперечном направлении (от подложки), а также вихревыми течениями в расплаве, обусловленными термокапиллярным эффектом [11, 12].

Термическая обработка синтезированного металла приводит к формированию рекристаллизованного зерна, выделению частиц вторичной упрочняющей фазы.

Лучшая по сравнению со сплавом ЭП648 свариваемость позволяет получать из сплава ВЖ159 практически бездефектные синтезированные заготовки и детали, в то время как для сплава ЭП648 после синтеза характерно наличие трещин в объеме формирующихся треков (рис. 1).

Для синтезированного материала из сплава ЭП648 газостатическая обработка является обязательной, так как применение только термической обработки (ТО) не обеспечивает устранение анизотропии (табл. 1), связанной в термообработанном состоянии с наличием трещин и их преимущественной ориентацией перпендикулярно плоскости построения. При этом полного выравнивания анизотропии не удастся добиться и после применения ГИП, что связано с остаточными дефектами и несплошностями.

Для сплава ВЖ159 в синтезированном виде характерны весьма близкие значения пластических характеристик для вертикально и горизонтально выращенных образцов. Выраженная анизотропия наблюдается по прочностным характеристикам: предел прочности вертикальных образцов на 12–13% ниже предела прочности для горизонтально выращенных образцов, а предел текучести – на 15–18% ниже, что связано с довольно высокими внутренними напряжениями после синтеза (табл. 2).

Применение термической обработки, состоящей из закалки и двухступенчатого старения, позволяет значительно (до 3–5%) снизить анизотропию прочностных характеристик даже без применения ГИП (рис. 2).

Газостатическая обработка практически не оказывает влияния на кратковременную и длительную прочность синтезированного сплава ВЖ159, что, учитывая его плотную исходную структуру, хорошо согласуется с данными работ [13, 14], полученными для сплавов, изготовленных по традиционным технологиям.

Столь высокие характеристики синтезированного материала обеспечиваются благодаря

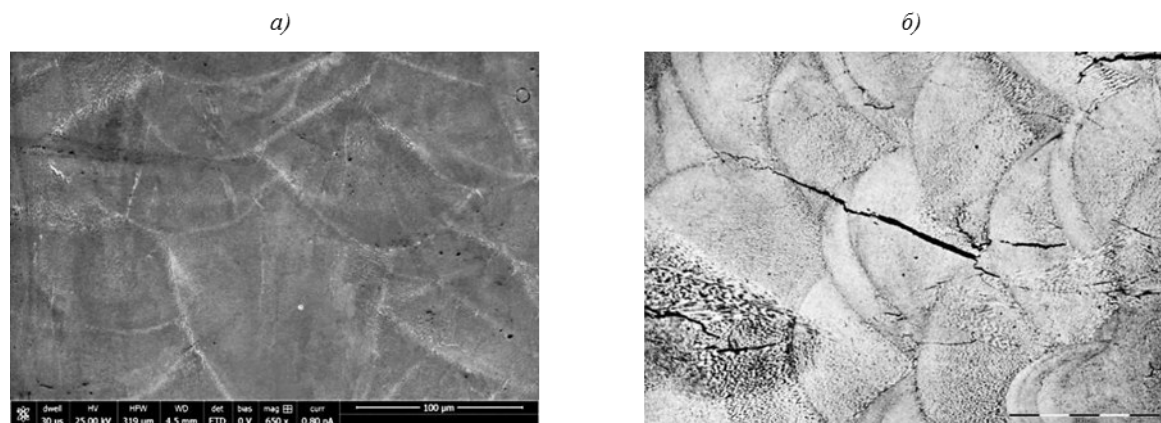


Рис. 1. Структура синтезированных образцов из сплавов ВЖ159 (а) и ЭП648 (б) в состоянии после селективного лазерного сплавления (СЛС)

Таблица 1
Механические характеристики (при 20°C) синтезированных образцов из сплава ЭП648 в вертикальном и горизонтальном направлении в состоянии после СЛС, ГИП и полной термической обработки (ПТО)

Состояние	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ
	МПа		%	
СЛС (N ₂) _{xy}	840	695	10,4	7
СЛС (N ₂) _z	890	610	31	44
СЛС (N ₂) _{xy} +ПТО (закалка+старение)	1145	825	10	12
СЛС (N ₂) _z +ПТО (закалка+старение)	1140	753	21,8	26,7
СЛС (N ₂) _{xy} +ГИП	1000	545	35	32
СЛС (N ₂) _z +ГИП	945	575	31,5	33
СЛС (N ₂) _{xy} +ГИП+старение	1120	725	19	20
СЛС (N ₂) _z +ГИП+старение	1110	655	28	31

Таблица 2
Механические свойства (при 20°C) синтезированных образцов из сплава ВЖ159 вертикальной и горизонтальной ориентации

Состояние	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ
	МПа		%	
СЛС (N ₂) _z	970	685	33	41
СЛС (N ₂) _{xy}	1100	825	32	36
Пруток+ТО (ТУ14-1-5305-95)	960	590	19	30

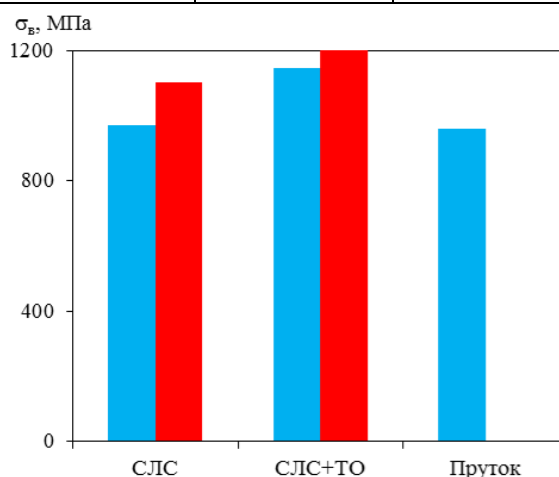


Рис. 2. Прочностные характеристики (■ – по вертикали; ■ – по горизонтали) синтезированных образцов из сплава ВЖ159 после селективного лазерного сплавления (СЛС) и термической обработки (ТО)

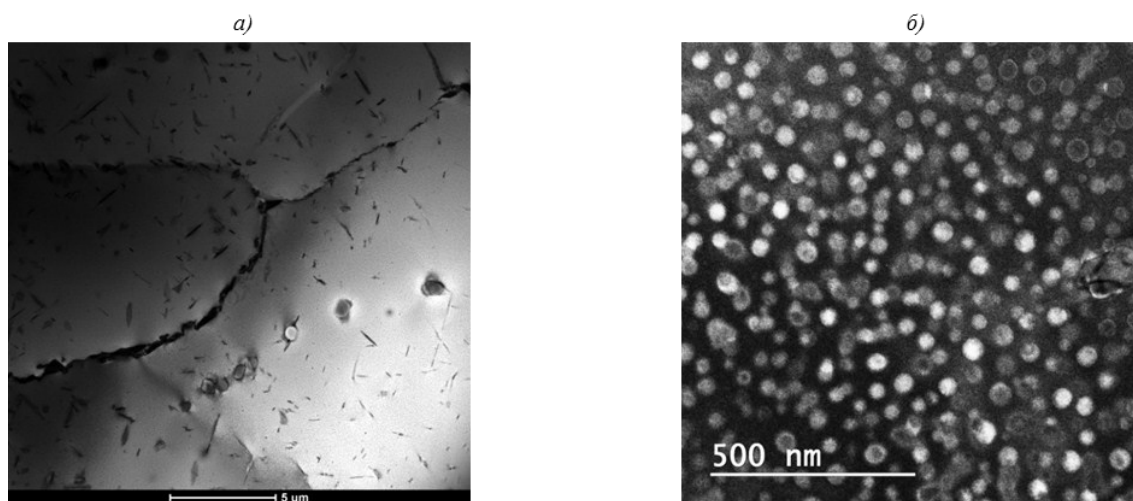


Рис. 3. Микроструктура синтезированного образца из сплава ВЖ159 после термической обработки: зерна и карборидная фаза (а); частицы упрочняющей γ'-фазы (б)

получению диспергированной структуры в процессе синтеза [15] и сохранению мелкого зерна в процессе последующей термической обработки (рис. 3, а). Для синтезированного металла также отмечается весьма однородное распределение карбоборидов и частиц упрочняющей фазы внутри зерна (рис. 3, б).

Заключения

Проведен анализ области применения жаропрочных слабостареющих сплавов на никелевой основе, показана перспектива применения технологии СЛС для изготовления деталей камеры сгорания ГТД из порошка сплава ВЖ159.

Рассмотрены результаты исследования микроструктуры и механических свойств образцов, полученных СЛС из порошка сплава ВЖ159. Проведено сопоставление микроструктуры синтезированных образцов со структурой полуфабрикатов,

полученных деформацией слитка из сплава ВЖ159. Показано, что технология СЛС и последующая термическая обработка обеспечивают формирование в заготовках деталей из сплава ВЖ159 мелкозернистой структуры твердого раствора с дисперсными выделениями карбидных фаз и упрочняющей γ' -фазы.

Определен уровень механических свойств синтезированных заготовок из сплава ВЖ159, а также их анизотропия в зависимости от направления выращивания заготовок. По сравнению с серийным материалом, сплав ВЖ159 с синтезированной структурой имеет более низкие остаточные напряжения, после термической обработки анизотропия механических свойств значительно меньше, чем у сплава ЭП648. Благодаря более высокой технологичности сплав ВЖ159 обеспечит повышение выхода годного при производстве деталей методом СЛС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Оспеникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. №3. С. 47–54.
3. Каблов Е.Н. Что такое инновации // *Наука и жизнь*. 2011. №11. С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информац. матер. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
5. Кисель В., Гулевич А. Иттербиевые твердотельные лазерные системы // *Фотоника*. 2011. №2. С. 20–24.
6. Евгенов А.Г., Неруш С.В., Василенко С.А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. 2014. №5. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4.
7. Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. 2015. №2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
8. Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Карачевцев Ф.Н., Мазалов И.С. Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // *Технология машиностроения*. 2015. №9. С. 11–16.
9. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. 2014. №9. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.04.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.
10. Gorbovets M.A., Bazyleva O.A., Belyaev M.S., Khodinev I.A. Low-cycle fatigue of vkna type single-crystal intermetallic alloy under «hard» loading conditions // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. No. 7–8. P. 724–728.
11. Хоменко М.Д., Низьев В.Г., Мирадзе Ф.Х., Гришаев Р.В. Исследования ИПЛИТ РАН по моделированию лазерного спекания металлических порошков // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сб. докл. Междунар. науч. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 6.*
12. Низьев В.Г., Мирадзе Ф.Х. Численное моделирование лазерного спекания металлических порошков // *Вестник Российского фонда фундаментальных исследований*. 2014. №3 (83). С. 58–67.
13. Светлов И.Л., Хвацкий К.К., Горбовец М.А., Беляев М.С. Влияние горячего изостатического прессования на механические свойства литейных никелевых жаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №3 (36). С. 10–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-10-14.
14. Svetlov I.L., Iskhodzhanova I.V., Evgenov A.G., Naprienko S.A. High-temperature creep and the defect structure of nickel-based superalloy single crystals after hot isostatic pressing // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. No. 4. P. 330–335.
15. Суфияров В.Ш., Попович А.А., Борисов Е.В., Полозов И.А. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава // *Цветные металлы*. №1 (865). 2015. С. 79–84.