

УДК 621.074; 621.791.725; 621.431.75; 669.018.44

## ПРИМЕНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЕСТЕСТВЕННЫХ КОМПОЗИТОВ В ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЛОПАТОК РОТОРА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Климов В.Г.\* , Никитин В.И., Никитин К.В, Жаткин С.С., Когтева А.В.**

*Самарский государственный технический университет,  
СамГТУ, ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100, Россия*

*\* e-mail: vadim3945@yandex.ru, v.klimov@uecrus.com*

Статья поступила в редакцию 26.11.2018

---

Предлагается использование жаропрочных никелевых порошков марок типа ВПр в качестве износостойких наплавочных материалов, наносимых при помощи лазерного воздействия. Выявлена особенность формирования структуры описываемых материалов, проявляющаяся при высоких скоростях охлаждения в виде образования естественных композитов с дисперсионным упрочнением по границе дендритного каркаса. Данная структура имеет ненаправленное расположение дендритной матрицы и обильное выделение упрочняющих фаз, повышающее износостойкие характеристики полученного композита.

Описан оригинальный метод восстановительной наплавки, позволяющий производить ремонт и модифицирование лопаток ротора газотурбинных двигателей (ГТД) с повышением износостойкости контактных поверхностей детали. На основе проведенных сравнительных исследований, включающих в себя анализ на растровом сканирующем электронном микроскопе, измерение микротвердости и коэффициента линейного расширения материалов, испытания абразивной стойкости наплавки и их усталостной прочности доказана возможность применения материалов марок типа ВПр в качестве альтернативы классическим износостойким композитам с механической примесью различных карбидов. Показано, что в условиях импульсного лазерного воздействия при высоких скоростях охлаждения растёт средняя твёрдость и общая стойкость к абразивному износу некоторых сплавов ВПр за счёт формирования мелкодисперсной стабильной эвтектической структуры, близкой к исходному порошkovому материалу. Выявлены положительные эксплуатационные характеристики сплавов марок ВПр 11-40Н и ВПр 27, позволяющие применять их при восстановлении лопаток ротора ГТД.

*Ключевые слова:* лазерная порошковая наплавка, лопатка ротора ГТД, порошковая ванна, микротвердость, микроструктура, электронная микроскопия, локальный абразивный износ, естественный композит, карбид, карборид, структурная наследственность, усталостные испытания.

---

Стоимость производства и эксплуатации газотурбинных двигателей, применяемых в авиации, нефтегазовой или энергетической индустрии, составляет значительную долю затрат, снижающих чистую маржинальную прибыль организаций-эксплуатантов. Понижение данных затрат является естественным стремлением любого холдинга. На этом фоне возможность поддержания ресурса газотурбинного двигателя с наименьшими затратами для себя остается основным критерием конкурентоспособности производителя на рынке.

Наибольшая доля в стоимости изготовления газотурбинного двигателя приходится на лопаточное производство. Несмотря на постоянный прогресс технологии изготовления лопаток ГТД, она остается крайне затратной, и наблюдается динамика увеличения доли ее стоимости в общих затратах. Ресурс работы ГТД напрямую зависит от условий его эксплуатации и вследствие износа лопаток ротора значительно снижается, помимо этого, потеря исходной геометрии пера данных лопаток снижает КПД двигателя в целом. Длительная эксплуатация на режимах выше нормы (к примеру, форсаж) может приводить к необходимости практически полной замены лопаток нескольких ступеней ротора турбины и компрессора [1, 2]. Как показывает практика, это приводит к сильному удорожанию ремонта газотурбинного двигателя, что заставляет искать пути решения данной проблемы, не прибегая к репроизводству

деталей и сборочных единиц (ДСЕ) горячей части газогенератора по причине большой его стоимости. Среднестатистические данные предприятий АО «ОДК» показывают, что стоимость ремонта турбины авиационного двигателя 4-го поколения может превосходить стоимость ремонта компрессора на 400—700%.

На рис. 1 представлена динамика изменения конструкции, материалов и технологий производства лопаток ротора турбины ГТД в зависимости от поколений двигателей.

На данный момент существуют различные способы восстановления геометрии лопаток ГТД. Широко распространен метод дуговой наплавки, описанный ещё в 1976 г. в работах И.А. Пермиловского (ИЭС им. Е.О. Патона.), в 2000 г. в патенте В.И. Колосова (ОАО «Пермский моторный завод»), а также (развитие данной тематики) в работе 2004 г. Л.И. Сорокина (ФГУП «ВИАМ») [3—7]. В настоящее время практически все существующие на территории России предприятия, специализирующиеся на производстве или ремонте газотурбинных двигателей, применяют технологии ремонта лопаток ГТД, построенные на методе дуговой наплавки в защитных газах, ввиду его простоты, доступности оборудования и низкой себестоимости. Однако для метода дуговой наплавки характерен ряд недостатков, таких, как большая зона термического влияния, разупрочнение структуры от перегрева и сложность при наплавке кра-

	<b>V поколение</b>	<b>VI поколение</b>	<b>III поколение</b>	<b>II поколение</b>	<b>I поколение</b>
ЦЕНА ПРОИЗВОДСТВА	6 – 35 т. руб.	25 – 55 т. руб.	30 – 65 т. руб.	70 – 200 т. руб.	100 – 350 т. руб.
НАЗНАЧЕННЫЙ РЕСУРС	500 – 3 000 т.час.	1 000 – 5 000 т.час.	1 500 – 7 000 т.час.	2 000 – 8 000 т.час.	2 500 – 10 000 т.час.
ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА	670-880 °С	830-980 °С	1030-1200 °С	1250-1500 °С	1500-1900 °С
СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ	НЕ ОХЛАЖДАЕМАЯ	РАДИАЛЬНО-КАНАЛЬНАЯ	ДЕФЛЕКТОРНАЯ	ЦИКЛОННО-ВИХРЕВАЯ	ТРАНСПИРАЦИОННАЯ
СПЛАВ, СТРУКТУРА	ЖС6, ЖС3 (ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ)	ЖС6К, ЖСЗДК (ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ)	ЖС6К-ВИ, ЖСБУ-ВИ (ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ)	ЖС-26-ВИ, ЖС-32-ВИ (НАПРАВЛЕННАЯ КРИСТ.)	ВЖМ1-ВИ, ВЖМ4-ВИ (МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ)
ПОКРЫТИЕ	БЕЗ ПОКРЫТИЯ	АЛИТИРОВАНИЕ	ХРОМАЛИТИРОВАНИЕ	КОНДЕНСИРОВАННОЕ ПОКРЫТИЕ	КОНДЕНСАЦИОННО-ДИФфуЗИОННОЕ ПОКРЫТИЕ
ПОКОЛЕНИЕ АВИАЦИОННОГО ГТД	I-II ПОКОЛЕНИЕ (1940-1955 гг.)	II ПОКОЛЕНИЕ (1950-1960 гг.)	III ПОКОЛЕНИЕ (1960-1970 гг.)	IV ПОКОЛЕНИЕ (1970-1990 гг.)	V ПОКОЛЕНИЕ (1990-2020 гг.)

Рис. 1. Динамика изменения конструкции лопаток ротора турбины по поколениям авиационных ГТД

евых элементов. Вследствие этого дуговая наплавка в среде защитного газа не получила широкого применения при восстановлении дефектных мест жаропрочных лопаток из литейных сплавов. Перегрев лопатки от электрической дуги в зоне термического влияния образует область коагуляции и распада  $\gamma'$ -фазы интерметаллида  $Ni_3Al$  [6, 7].

Данный интерметаллид (рис. 2) является основной жаропрочных свойств большинства деталей газовых турбин, производимых серийно на территории Российской Федерации [1].

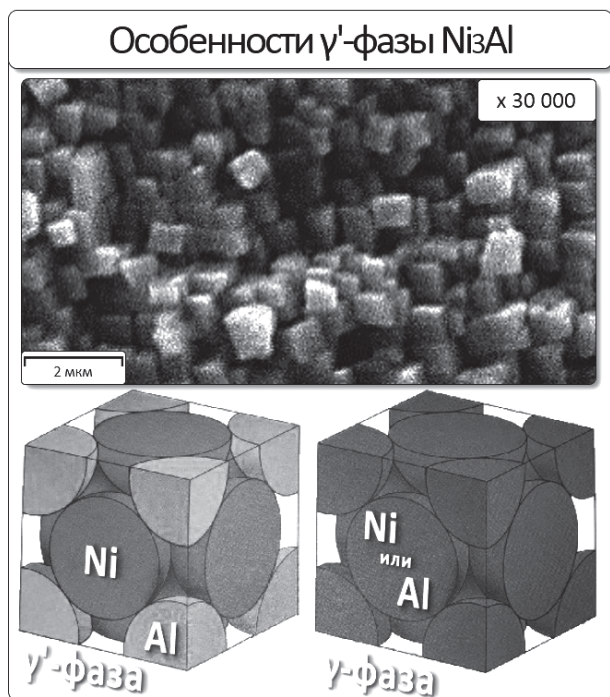


Рис. 2.  $\gamma'$ -фаза интерметаллида  $Ni_3Al$  в жаропрочных Cr-Ni сплавах

Перегрев от электрической дуги приводит не только к общему разупрочнению жаропрочных сплавов, но и к обильному образованию трещин как в процессе наплавки, так и при последующей механической обработке припуска [6]. По содержанию легирующих элементов, снижающих свариваемость, жаропрочные сплавы Cr-Ni можно разделить на три группы по склонности к образованию трещин в процессе сварки/наплавки: свариваемые, ограниченно свариваемые и тяжело свариваемые (рис. 3). Стоит обратить внимание на то, что наиболее распространённые сплавы, применяемые при изготовлении лопаток турбины ГТД (ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, ЖС26, ЖС26У, ЖС30 или ЖС32), относятся к группе «тяжело свариваемых».

Различные способы избежать образования трещин в зоне дуговой наплавки были описаны в

работе Л.И. Сорокина [6, 7] (ФГУП «ВИАМ»), но даже сам автор отмечает сложность применения подобной технологии, что ограничивает её использование на производстве. Помимо прочего, данная технология не предотвращает распад упрочняющей интерметаллидной фазы [7]. Для снижения риска образования трещин в подложке жаропрочного сплава на основе Ni и уменьшения коагуляции  $\gamma'$ -фазы  $Ni_3Al$  необходимо минимизировать зону термического влияния (ЗТВ), подогреть подложку для снижения внутренних растягивающих напряжений при наплавке, одновременно не допуская перегрева подложки значительно выше  $1395\text{ }^\circ\text{C}$  [8–14].

Пути достижения данного эффекта достаточно сложны. Использование теплоотводящей оснастки снижает эффект подогрева подложки, как и охлаждение защитными газами. В то же время большой перегрев приводит к распаду интерметаллида  $Ni_3Al$  и снижению прочностных характеристик сплава. Учитывая высокую теплопроводность жаропрочных сплавов на основе Ni (более  $90\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ), стабильное протекание процесса наплавки обеспечивается локализацией зоны нагрева и ограничением тепловложения с одновременным сохранением температуры подложки в горячем состоянии. В наибольшей степени эти усло-



Рис. 3. Диаграмма оценки свариваемости жаропрочных сплавов Cr-Ni по склонности к образованию трещин: I – свариваемые; II – ограниченно свариваемые; III – тяжело свариваемые



вия обеспечиваются лазерной импульсной наплавкой, при которой, помимо этого, имеется возможность регулировки в широком диапазоне параметров лазерного излучения.

В данной работе в качестве объекта исследования выбрана среднестатистическая неохлаждаемая лопатка ротора турбины турбостартера (ТС) авиационного ГТД НК-12МП/МА. Среди двигателей для дальней авиации НК-12МП/МА является наиболее часто ремонтируемым, что создаёт постоянный стабильный поток лопаток для восстановления. Лопатку получают методом литья в керамические оболочковые формы с равноосной кристаллизацией из сплава ЖС6К (ТУ 1-809-1025-98, табл. 1).

Износ лопатки ТС происходит по торцу пера и имеет абразивный характер, согласно ранее опубликованным материалам [15–18]. На рис. 4 представлены разновидности износа лопаток ТС.

По среднестатистическим данным, износу, превышающему допустимый для эксплуатации, подвергаются 40–85% лопаток, которые до внедрения технологии ремонта заменялись новыми. На основе анализа статистики износа при восстановлении геометрии пера была поставлена задача повышения стойкости его торцевой кромки к абразивному истиранию.

В статье рассматриваются различные присадочные материалы для последующей наплавки, среди которых порошковые высокотемпературные никелевые материалы типа ВПр, разработанные ФГУП «ВИАМ» (г. Москва) и композитный порошковый материал с механической примесью плакированного литого карбида вольфрама ( $WC-W_2C$ ) марки Рок-Дюр 6040 из серии «Сфекорд Рок-Дюр» производства ООО «СП Техникорд» (г. Москва). Механический композит Рок-Дюр взят в качестве классического износостойкого композита для сравнения износостойких и эксплуатационных характеристик. По утверждению производителя, данный материал обладает высокой абразивной износостойкостью в сочетании с сопротивлением давлению, механическим и тепловым ударам, коррозии и кавитации. Основные характеристики сплавов приведены в табл. 1.

Необходимо отметить, что порошки ВПр11-40Н и Рок-Дюр 6740 являются композитными смесями, что отчётливо проявляется в их морфологии, представленной на рис. 5. Исследуемые порошки были получены методом газовой атомизации, получившей широкое распространение на европейском рынке и в настоящее время усиленно внедряемой на территории РФ такими производителями, как АО «Полема» и ФГУП «ВИАМ». Порошки марок ВПр применяются в качестве

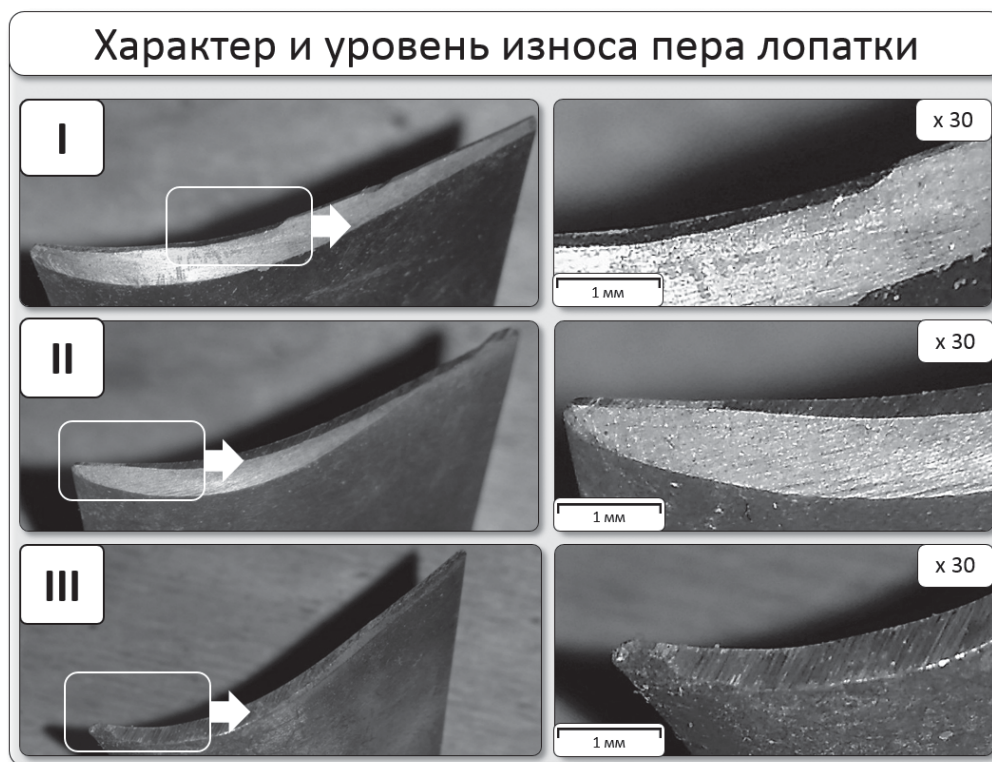


Рис. 4. Виды износа лопаток ТС двигателя НК-12МП/МА по группам: I – износ до 1 мм; II – износ до 2 мм; III – износ свыше 2 мм

Таблица 1

Классификация и рабочая температура материалов

Материал	Нормативный документ	Классификация	Основные компоненты	Дисперсность, мкм	Рабочая температура, °С
<b>ЖС6К</b>	ТУ 1-809-1025-98	Жаропрочный литейный сплав	Ni-Cr-Al-W-Mo-Co-Ti-Si-C	-	До 1000
<b>ВПр11-40Н</b>	ТУ 1-809-108-91	Высокотемпературный литой порошковый припой	60% (Ni-Cr-Al-Fe-Co-B-Si-C) + 40% (Ni-B-Si)	100-250	До 900
<b>ВПр24</b>	ТУ 1-809-838-89	Высокотемпературный литой порошковый припой	Ni-Co-Cr-Nb-W-Al-Mo-Ti-Si-B-C	150-350	До 1050
<b>ВПр27</b>	ТУ 1-595-4-1021-2007	Высокотемпературный литой порошковый припой	Ni-Co-Cr-W-Si-Mo-Al-Nb-B-C	100-300	До 1000
<b>Рок-Дюр 6740</b>	ТУ 1526-001-86297481-2008	Композиционный порошковый материал на основе сплава Ni с добавкой литого плакированного карбида вольфрама	60% (Ni-Cr-B-Si-C) + 40% [88(WC-W <sub>2</sub> C) + 12% (Ni-Cr-B-Si-C)]	100-200	До 700

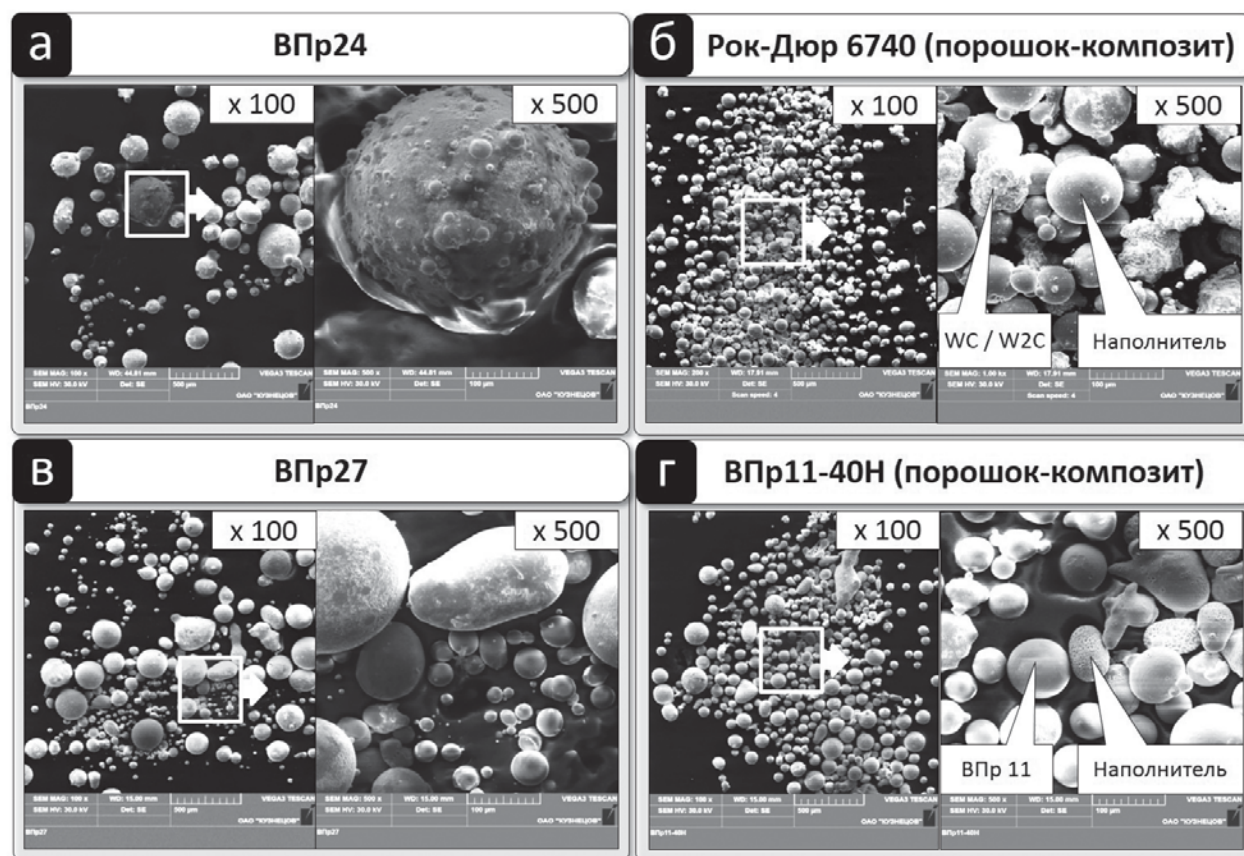


Рис. 5. Морфология порошков: а – ВПр24; б – Рок-Дюр 6740; в – ВПр27; г – ВПр11-40Н

припоев при высокотемпературной пайке, и к ним предъявляются менее жёсткие требования по сферичности и дисперсности, в отличие от порошков, используемых при селективном лазерном синтезе [15]. Тем не менее, исходя из анализа морфологии, порошок марки ВПр11-40Н характеризуется незначительным разбросом по дисперсности и приемлемой сферичностью. Стоит также отметить, что разработанный метод наплавки не предъявляет жёстких требований к качеству порошкового материала и может применяться с порошками дисперсностью 50—500 мкм, что облегчает повторное использование отработанного присадочного материала после просеивания.

Ремонтная технология предполагает применение импульсной лазерной наплавки, производившейся в данном исследовании на установке ALFA-300 (изготовитель ООО «ЛазерФорм», г. Зеленоград, Россия). Для восстановления серийных лопаток ТС способ наплавки в «порошковой ванне» был оптимизирован и доработан (относительно описанного ранее [15—18]). С этой целью была разработана универсальная модульная оснастка (рис. 6). Общая длительность технологического процесса при восстановлении среднестатистической лопатки, включая операции сборки с оснасткой, наплавки и замены порошка, составляет не более 7 мин. В оснастке имеются сменные модули-вкладыши для различных типов лопаток, из-

готавливаемые индивидуально. Через данные вкладыши подаётся инертный газ для дополнительной защиты сварочной ванны при наплавке. Присадочный порошок после процесса наплавки заменяется новым, а отработанный проходит просев.

### Методы исследования

Восстановленные зоны исследовались на электронном микроскопе Tescan (Чехия) VEGA3 LM с модулем Oxford instruments X-Max, а измерения твердости проводились на микротвердомере «EMCO-TEST PrufmaSchinen GmbH» (Австрия) DuraScan-10 на базе центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) предприятия ПАО «Кузнецов».

Испытания на абразивный износ были проведены в лаборатории наноструктурированных покрытий ФГБОУ ВО «СамГТУ» (г. Самара) на установке «Универсал-1А», обеспечивающей через систему датчиков и средств регистрации непрерывный контроль нормальной нагрузки и момента трения. Испытания проводились в течение 15 мин локально на участке зоны наплавки, материал контртела – трубка из стали 40Х (закалка до HRC 46-48) с внешним диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм. Применялась нормальная нагрузка 30 кгс с частотой вращения шпинделя 600 об/мин. В качестве среды использовалась алмазная паста АСМ-3/2-НОМГ (ГОСТ 25593-83), соответствен-



Рис. 6. Процесс лазерной импульсной наплавки в «порошковой ванне» с применением универсальной модульной оснастки



но износ образца осуществлялся алмазным порошком дисперсностью 2—3 мкм. Площадь трения составляла  $1,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ .

Коэффициент термического линейного расширения (далее — КТЛР) материалов измерялся на механическом dilatометре лаборатории кафедры «ЛиВТ» ВО «СамГТУ» (г. Самара). Измерения КТЛР на каждом образце проводились в течение 5 часов от 50 °С до 900 °С с шагом 25 °С.

Сравнительные испытания на усталость для определения предела выносливости лопаток проводились на электродинамическом стенде центральной заводской лаборатории предприятия ПАО «Кузнецов» (г. Самара) стандартным методом в соответствии с ОСТ 1 008070-77. База испытаний составляла  $2 \cdot 10^7$  циклов при комнатной температуре с частотой колебания  $f_{2-1} \approx 4500$  Гц. Лопатки препарировались пятью тензорезисторами типа КФ5П1-3-100-Б12 для снятия и контроля колебаний. Для построения кривой усталости было испытано по 20—25 новых и восстановленных лопаток.

### Результаты исследований

На рис. 7 представлены результаты измерения КТЛР исследуемых материалов, по данным которого определены два материала (ВПр27 и ВПр11-40Н), наиболее близкие по тепловому расширению к материалу основы (ЖС6-К). Данное сходство снижает вероятность образования трещин в процессе наплавки и после остывания материалов.

На рис. 8 представлена микроструктура образцов восстановленных лопаток ТС. Зона наплавки припоев ВПр11-40Н и ВПр24 имеет схожую структуру, представляющую дендритный каркас с

сетью мелких аустенитных зерен на основе никеля размерами не более 10—50 мкм (рис. 8,а,б), по границам которых распределяются мелкодисперсные твердые соединения на основе Cr, W, Mo и Nb. При наплавке ВПр27 (рис. 8,в) формируется ещё более мелкая структура (размер дендритной ячейки 2—10 мкм), также схожая со структурой материалов, описанных выше. Из анализа микроструктуры можно сделать вывод, что лазерное излучение как метод нанесения покрытия формирует мелкодисперсную структуру наплавляемого порошкового материала припоев с предположительно интерметаллидной и карбидной сеткой, минимально влияющих на структуру основного материала подложки (лопатки ТС).

Наплавка композитного порошка Рок-Дюр 6740 (рис. 8,г) формирует структуру с карбидами ( $\text{WC} / \text{W}_2\text{C}$ ) размером порядка 20—80 мкм и равномерно распределенной эвтектикой W по Ni-Co матрице, образовавшейся в результате распада карбидов WC и  $\text{W}_2\text{C}$ .

В нижней части рис. 8 приведены результаты измерения микротвердости зон лазерной наплавки.

После лазерной наплавки высокотемпературных порошковых припоев ВПр наблюдался существенно меньший разброс в распределении твердости по всей толщине наплавленного материала по сравнению с износостойким Рок-Дюр 6740, что обусловлено образованием в этих зонах мелкодисперсной дендритной структуры 1-го порядка, содержащей различные твердые образования.

Восстановленные лазерной наплавкой лопатки подвергались механической обработке для придания ей первоначального профиля. По ре-

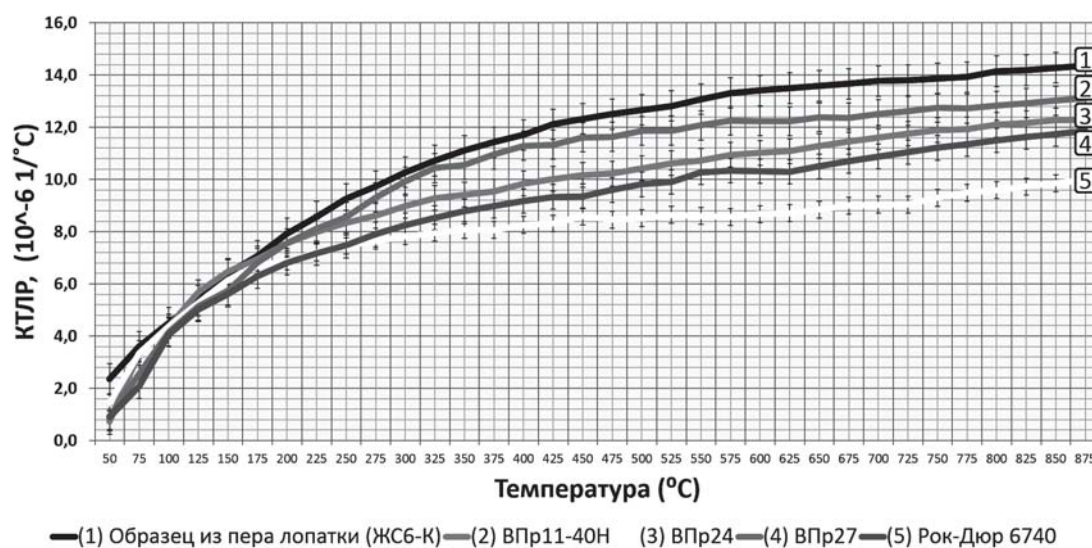


Рис. 7. Результаты измерения КТЛР исследуемых материалов



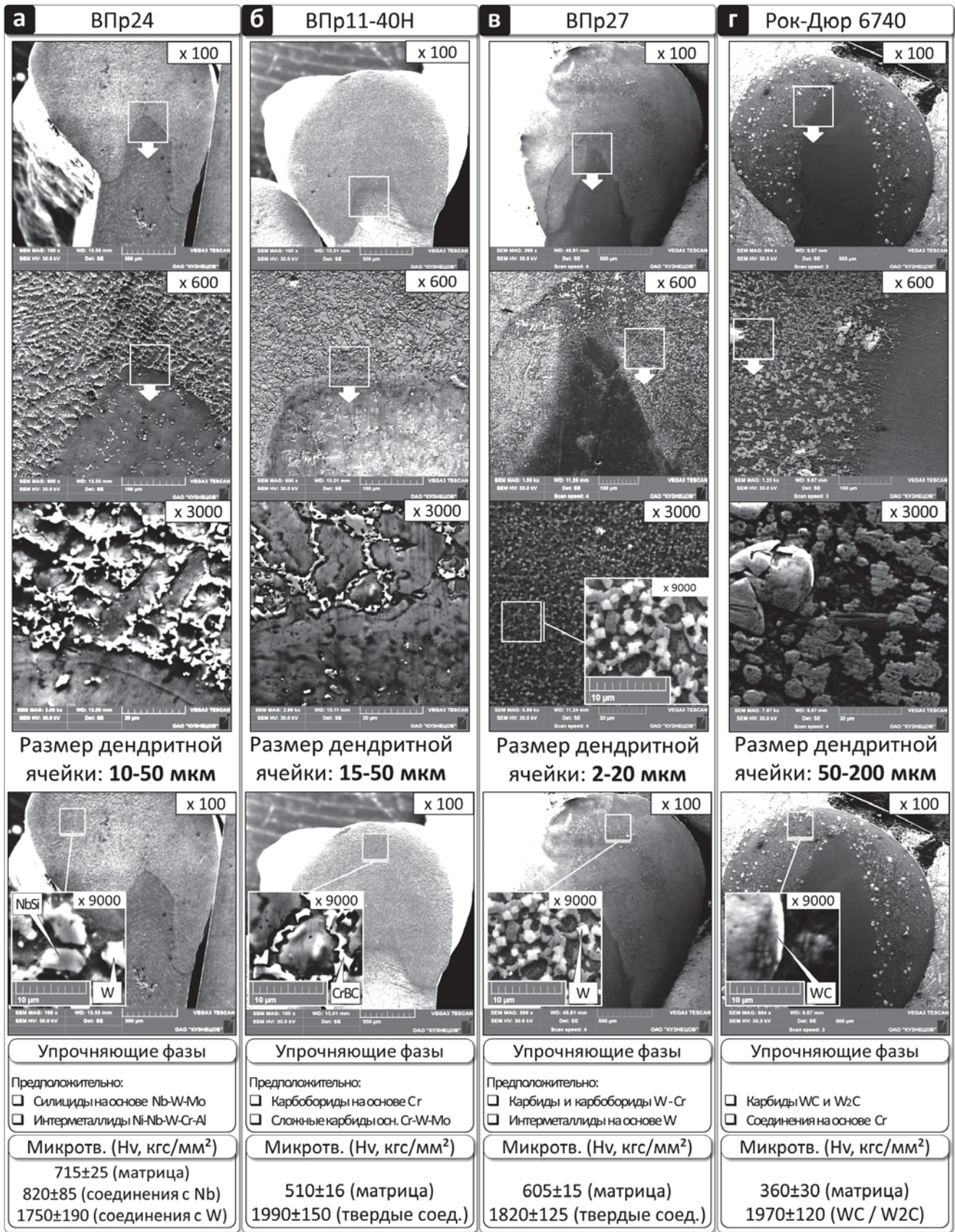


Рис. 8. Структура, упрочняющие фазы и микротвердость наплавленных слоёв: а – ВПр24; б – ВПр11-40Н; в – ВПр27; г – Рок-Дюр 6740



зультатам рентгеновского и люминесцентного контроля восстановленных лопаток в лаборатории НМК предприятия ПАО «Кузнецов» не было выявлено ни внешних (трещины), ни внутренних (поры, несплавления) дефектов.

По результатам испытаний на локальный абразивный износ установлено (табл. 2), что приемлемой износостойкостью, сравнимой со стойкостью карбидосодержащего материала Рок-Дюр 6740, обладают порошковые припои ВПр11-40Н и ВПр27. Стоит также учесть, что после обработки шлифованием припуска наплавки данным материалом остается относительно небольшая зона износостойкого слоя. Этот фактор критичен для Рок-Дюр 6740 из-за неравномерного распределения карбидной фазы ( $WC / W_2C$ ). В модифицированном слое может оказаться малое количество твердых фаз, что снизит общую стойкость к износу восстановленной кромки. Формируемая мелкодисперсная структура и равномерно распределенная по площади наплавки упрочняющая фаза в жаропрочных никелевых припоях типа ВПр11-40Н и ВПр27 позволяет сохранить общую стойкость к износу кромки пера лопатки ТС после шлифования.

По результатам исследований, у порошкового припоя ВПр11-40Н наилучшие показатели износостойкости.

Для определения степени влияния условий и скорости охлаждения порошкового материала ВПр11-40Н после плавления были исследованы

несколько образцов, полученные различными методами:

— печной нагрев в вакуумной печи сопротивления СНВЭ 2.4.2-16/2 (производитель ООО «Призма», г. Новосибирск, Россия);

— дуговая наплавка в среде защитных газов (Ar) при помощи инвертора Tetrax 350 AC/DC (Firma EWM AG, Германия);

— лазерная импульсная наплавка на установке ALFA-300 (изготовитель ООО «ЛазерФорм», г. Зеленоград, Россия);

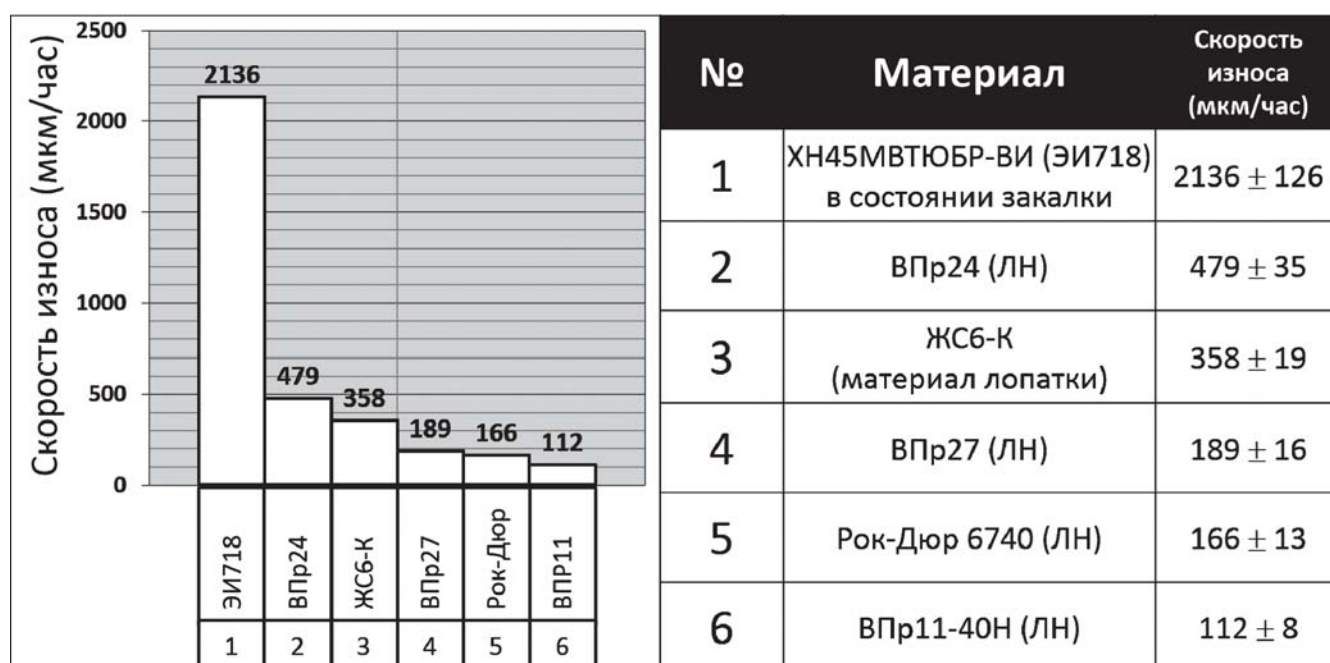
— газовая атомизация струёй холодного газа на атомизере EIGA 50/500 (Firma ALD, Германия).

На рис. 9 представлены результаты электронного микроскопического исследования полученных образцов с зависимостями твердости матрицы материала ВПр11-40Н от скорости охлаждения расплава.

На основе результатов исследования было установлено, что высоколегированный порошковый материал ВПр11-40Н имеет широкий интервал изменяемых характеристик, зависящих напрямую от скорости остывания расплава. С повышением скорости кристаллизации сплава растёт степень дисперсности твердых частиц на основе Cr, которую можно проследить по ярковыраженной ликвации Cr на карте распределения элементов при низких скоростях охлаждения (рис. 9). С повышением скорости охлаждения уровень ликвации заметно снижается и Cr более равномерно насыщает матрицу сплава. Это должно положительно ска-

Таблица 2

Результаты испытаний на локальный абразивный износ



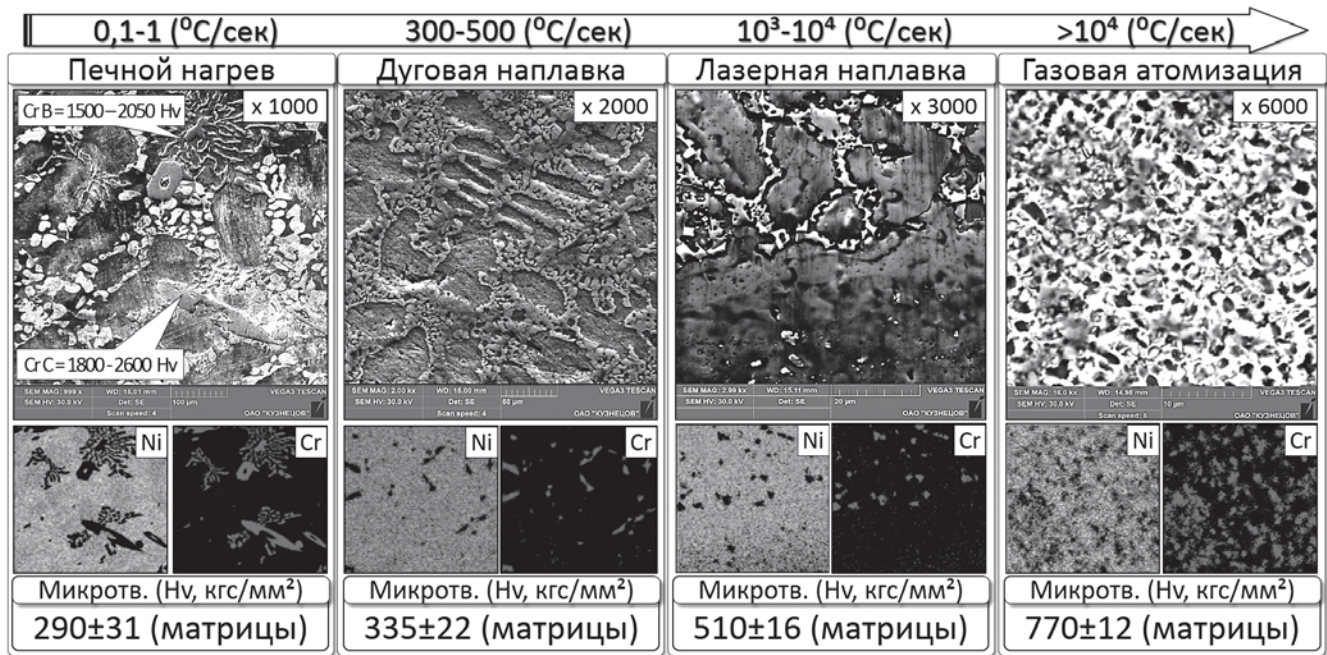


Рис. 9. Зависимость микроструктуры и микротвёрдости материала ВПр11-40Н от скорости охлаждения расплава, достигнутой различными источниками нагрева. Под снимками указано среднее значение микротвёрдости матрицы сплава ВПр11-40Н в его различных состояниях

заться на жаростойких свойствах полученных наплавленных слоев, поскольку Cr наряду с Al снижает влияние высокотемпературной коррозии на структуру сплава при работе деталей в среде горячих газов.

Низкую среднюю твёрдость матрицы образцов ВПр11-40Н при печном нагреве можно объяснить сильно выраженной эвтектической структурой с большим разбросом крупных карбидов хрома (Hv = 1800–2600 кгс/мм<sup>2</sup>) и боридных эвтектик (Hv = 1600–2050 кгс/мм<sup>2</sup>), снижающих среднее содержание данных элементов в матрице всего материала (потому что на их образование уходит много хрома и бора). Боридные эвтектики легкоплавки, что повышает риск оплавления и распада их в процессе термообработки или нагрева до рабочих температур газовой турбины. При длительном нагреве в жидком расплаве бор интенсивно диффундирует в основной металл, вызывает эрозию материала подложки и пагубно влияет на прочность [19, 20]. Исходя из этого, необходимо минимизировать время нахождения его в жидком расплаве при наплавке с целью купирования данного эффекта.

С ростом скоростей охлаждения и уменьшением ликвации в сплаве, боридные эвтектики не успевают образовываться в расплаве, бор связывается в более равновесные и стабильные соединения карборидов, кристаллизующихся на пер-

вичных интерметаллидах. Кроме того, как видно из рисунка, при импульсной лазерной наплавке и газовой атомизации наблюдается измельчение структуры сплава, что положительно сказывается на его прочностных характеристиках и повышении микротвердости. Отличительной особенностью рассматриваемого сплава является значительное влияние химического состава на формируемую структуру, которая сохраняет наличие явно выделенных отдельных твердых частиц даже при критических скоростях охлаждения. Наследование данной структуры происходит в широком диапазоне скоростей охлаждения, однако при медленном охлаждении в печи наблюдается обильное выделение боридных эвтектик, отрицательно влияющих на свойства сплава (рис. 9). Применение лазерной наплавки позволило сформировать сплав со структурой, близкой к структуре и механическим свойствам изначального порошкового материала.

Стоит учесть, что все рассматриваемые образцы ВПр11-40Н по сравнению с другими жаропрочными сплавами показывают значительно более высокую износостойкость. В частности, лист из сплава ХН45МВТЮБР-ВИ (ГОСТ 5632-2014) в состоянии закалки имеет стойкость к износу в пределах 2136–126 мкм/час. На рис. 10 показаны зависимости стойкости к абразивному износу, средней твёрдости матрицы сплава и разме-



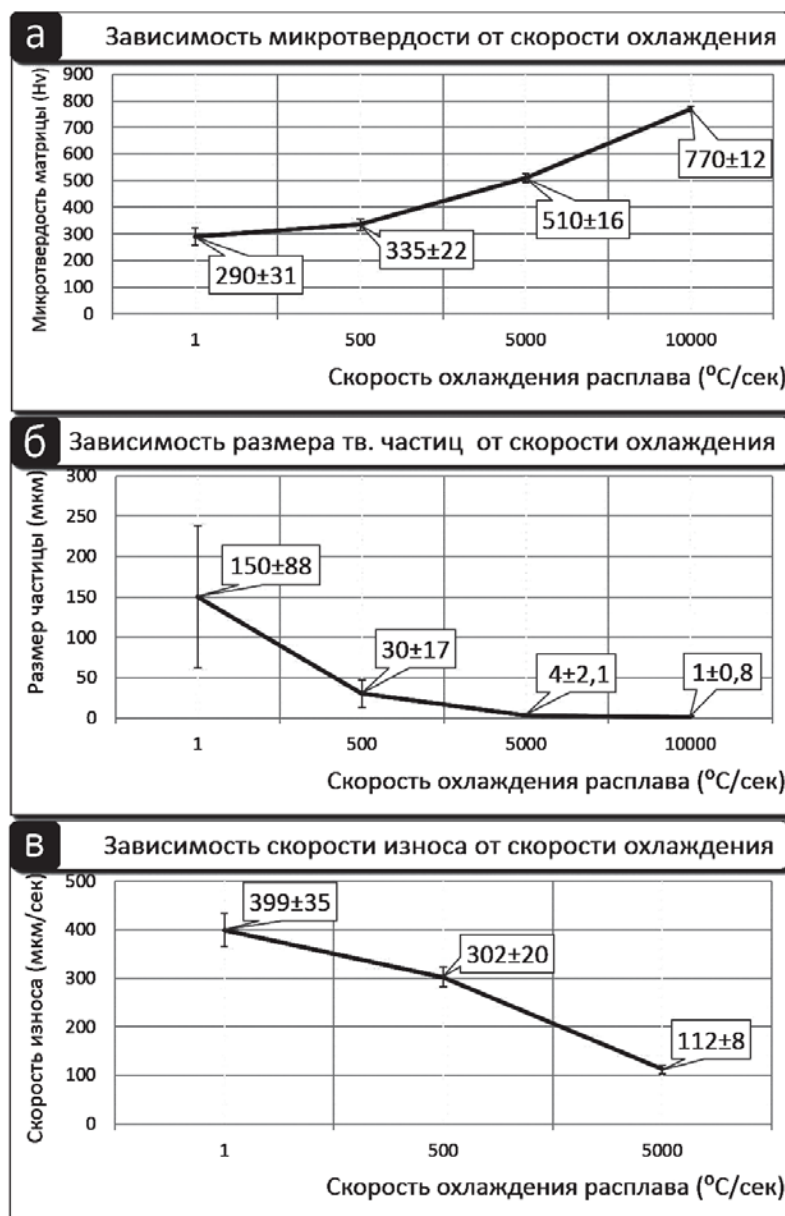


Рис. 10. Различные зависимости от скорости остывания расплава ВПр11-40Н: *а* – микротвердости матрицы материала; *б* – размера упрочняющих соединений на основе Cr; *в* – стойкости к абразивному износу сплава

ра твёрдых соединений с хромом (карбидов и карбоборидов на основе хрома) от скорости охлаждения расплава ВПр11-40Н.

Необходимо обратить внимание на то, что большинство образуемых на высоких скоростях охлаждения соединений с Cr, отвечающих за стойкость сплава к износу, являются термостабильными с температурой плавления более 1900 °С и предположительно будут сохранять свои полезные свойства и при длительных воздействиях рабочих температур в составе двигателя. Малый размер упрочняющей фазы, формируемой лазерным излучением, и равномерное её диспергирование по матрице наплавки даёт достаточно высокую сред-

нюю твёрдость и высокие параметры сопротивления износу, что, учитывая малую область соприкосновения на торце пера лопатки с ответным телом, можно считать дополнительным положительным фактором.

На рис. 11 представлен подробный элементный анализ структуры сплава ВПр11-40Н, полученной методом лазерной импульсной наплавки. Стоит обратить внимание на то, что анализ зоны (1) показал наличие большого содержания бора и углерода, что свидетельствует о наличии сложных карбоборидных соединений с различными металлами (Cr, Mo, W). Данные соединения (зона 1), являются основой износостойкости в данной

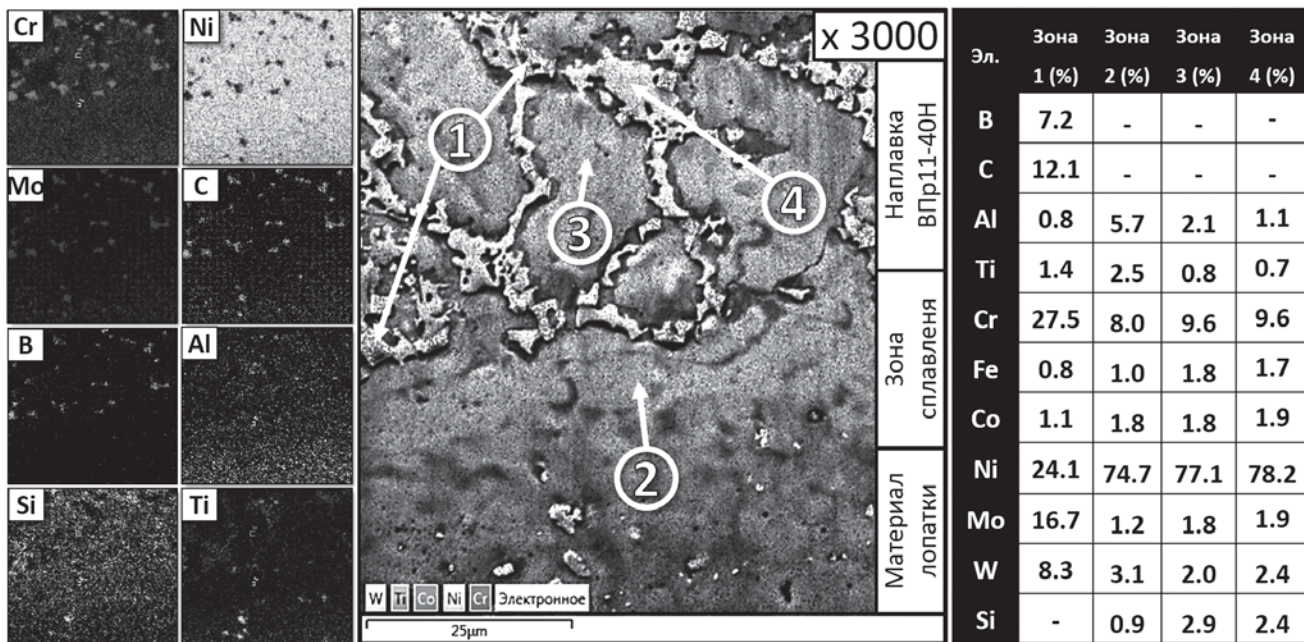


Рис. 11. Элементный анализ с цветовыми картами структуры сплава ВПр11-40Н, полученной методом лазерной импульсной наплавки

структуре сплава, отличаются большой твёрдостью ( $H_v = 1990 \pm 150$  кгс/мм<sup>2</sup>) и стойкостью к выкрашиванию при абразивном износе, помимо этого они повышают жаропрочные характеристики сплава и снижают текучесть за счёт межзёрненного дисперсионного упрочнения. По цветовому элементному анализу можно судить о характере их распределения по матрице наплавки.

В зоне (2) представлен элементный анализ области сплавления, отличающейся высокой од-

нородностью; в зонах (3) и (4) представлен состав прочих фаз, присутствующих в наплавленном слое.

С целью проведения сравнительных усталостных испытаний на электродинамическом стенде были использованы партия восстановленных лопаток с применением в качестве присадочного материала ВПр11-40Н и партия новых лопаток, не бывших в эксплуатации. На рис. 12 представлены результаты испытаний. На основании полученных

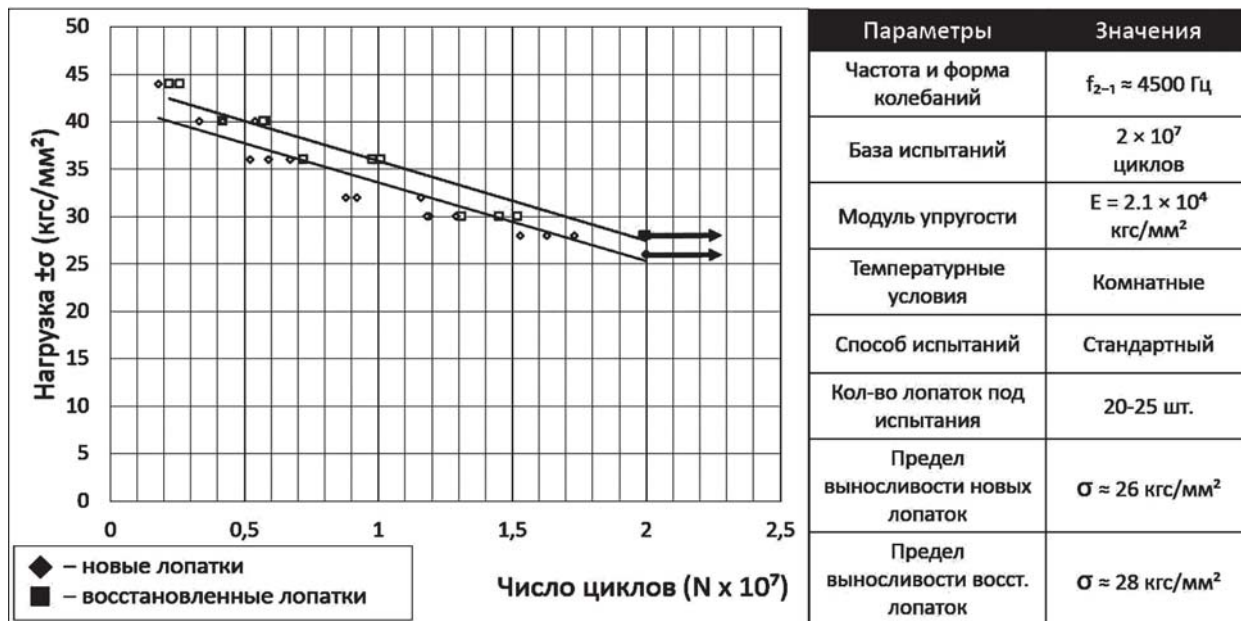


Рис. 12. Результаты усталостных испытаний и кривая усталости новых и восстановленных методом лазерной наплавки лопаток ТС



данных можно сделать выводы, что после восстановления по разработанной технологии лопатки не теряют свой запас прочности, сохраняя эксплуатационные характеристики.

Результаты фрактографического сравнительного анализа изломов разрушенных лопаток после проведения усталостных испытаний представлены на рис. 13. Видно, что очаг разрушения новых и восстановленных лопаток находится на вершине пера. Разрушение имеет усталостный транскристаллитный характер, на что указывает ступенчатый вид излома. Гладкий скол на вершине пера новой лопатки (рис. 13, слева) свидетельствует о начале разрушения по границе зерна. По результатам анализа цветовой элементной карты удалось определить границу наплавки в изломе восстановленной лопатки (рис. 13, справа).

следовать свойства, приближенные к изначальному порошковому присадочному материалу.

2. С ростом скорости охлаждения снижается общая ликвация и повышается содержание Cr в матрице материалов типа ВПр, что положительно сказывается на жаростойкости данных сплавов, нанесённых методом лазерной импульсной наплавки.

3. Повышение скорости охлаждения расплава сплава ВПр11-40Н приводит к резкому снижению размера аустенитных зерен и частиц карбидной/карбоборидной фазы и её равномерному распределению по объёму наплавки, вследствие чего растут средняя твёрдость матрицы и общая стойкость к абразивному износу сплава.

4. Широкий диапазон механических характеристик сплава ВПр11-40Н, напрямую зависящих

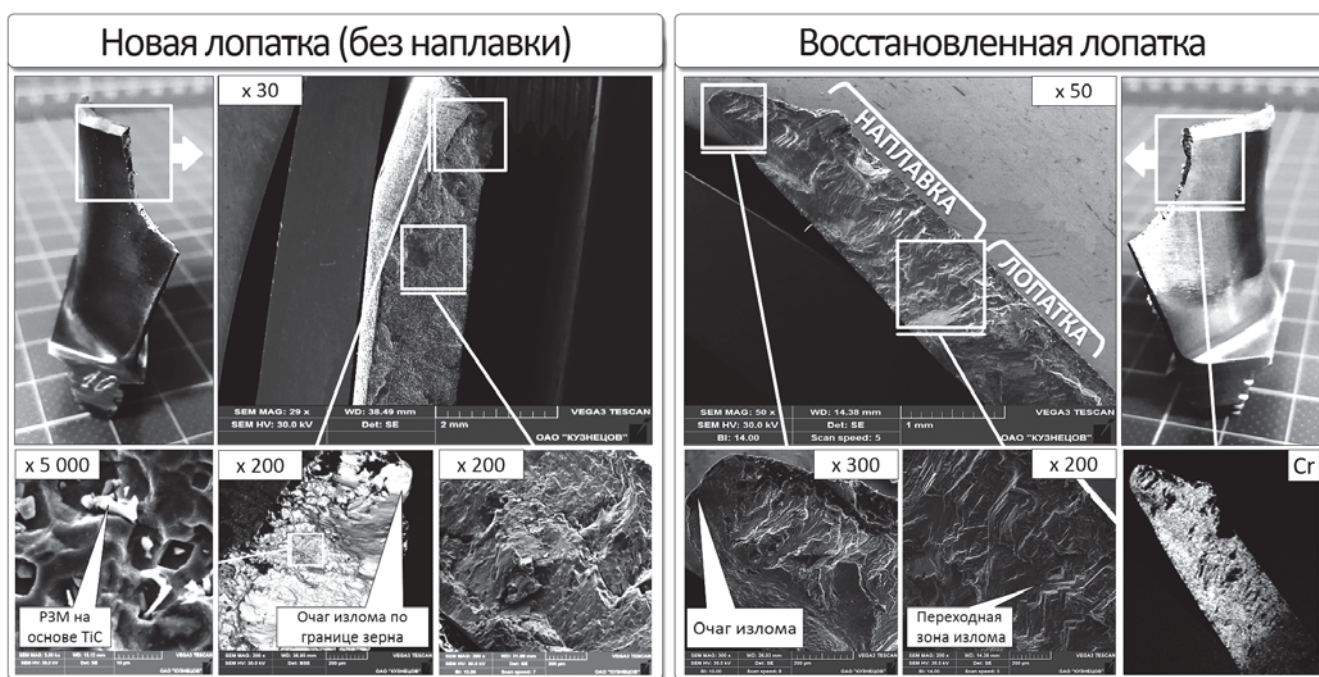


Рис. 13. Фрактографический анализ изломов разрушенных лопаток после испытаний на усталостную прочность: слева – новая лопатка не бывшая в эксплуатации; справа – лопатка, восстановленная лазерной импульсной наплавкой с применением сплава ВПр11-40Н

Основываясь на результатах усталостных испытаний, можно сделать предположение, что за счёт формирования мелкодисперсной структуры на вершине пера лопатки после лазерной наплавки незначительно повышается сопротивление к образованию хрупких изломов по границе зерен.

## Выводы

1. Метод лазерной импульсной наплавки формирует мелкодисперсную структуру сплавов ВПр, близкую к структуре, получаемой при распылении методом газовой атомизации, что позволяет на-

от формируемой литой структуры и скорости охлаждения расплава, дает возможность их контроля путём правильного выбора режимов лазерного излучения. Это позволяет управлять структурой наплавляемого материала и получать покрытия с балансом между износостойкими и прочностными свойствами.

5. Положительные результаты усталостных испытаний показывают возможность применения разработанной технологии при восстановлении высоконагруженных деталей горячего тракта ГТД – лопаток турбины.

## Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. — 2-е изд. — М.: Наука, 2006. — 632 с.
2. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Назаркин Р.М. и др. Структура и свойства монокристаллов жаропрочного никелевого сплава, содержащего рений и рутений // *Металлургия машиностроения*. 2013. № 1. С. 12-18.
3. Пермиловский И.А., Гейченко В.С., Фруман И.И. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей // *Автоматическая сварка*. 1976. № 5. С. 54–56.
4. Пермиловский И.А., Казанцева Н.А. Физико-механические свойства наплавленных карбидохромовых сплавов // *Автоматическая сварка*. 1976. №4. С. 52–54.
5. Колосов В.И. Способ восстановления длины пера лопаток компрессора газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления. Патент RU 2153965 С1. Бюл. №1. 27.09.1999.
6. Сорокин Л.И. Аргодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов // *Сварочное производство*. 2004. № 7. С. 20-26.
7. Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 // *Сварочное производство*. 1997. № 6. С. 12-17.
8. Yilmaz O., Gindy N., Gao J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2010. Vol. 26. No. 2, pp. 190-201. DOI: 10.1016/j.rcim.2009.07.001
9. Huang H., Gong Z.M., Chen X.Q., Zhou L. SMART robotic system for 3D profile turbine vane airfoil repair // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. Vol. 21. No. 4, pp. 275-283. DOI: 10.1007/s001700300032
10. Nowotny S., Scharek S., Beyer E., Richter K-N. Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007. Vol. 16. No. 3, pp. 344-348. DOI: 10.1007/s11666-007-9028-5
11. Wilson J.M., Piya C., Shin Y.C., Zhao F., Ramani K. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 80, pp. 170-178. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.084
12. Shitarev I.L., Smelov V.G., Sotov A.V. Repair of a gas turbine blade tip by impulse laser build-up welding // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 682, pp. 96-99. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.96
13. Smelov V.G., Sotov A.V., Kosirev S.A. Development of process optimization technology for laser cladding of GTE compressor blades // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. Vol. 9. No. 10, pp. 1854-1858.
14. Евгенов А.Г., Лукина Е.А., Королев В.А. Особенности процесса селективного лазерного синтеза применительно к литейным сплавам на основе никеля и интерметаллида Ni3Al // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. № 5(23). С. 3-11.
15. Климов В.Г., Жаткин С.С., Щедрин Е.Ю., Когтева А.В. Особенности восстановления геометрии пера газотурбинного двигателя методом лазерной порошковой наплавки // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015. Т. 17. № 2(4). С. 782-788.
16. Климов В.Г., Никитин В.И., Жаткин С.С. Восстановление высоты пера лопаток ГТД высокотемпературными порошковыми припоями // *Литейное производство*. 2015. № 12. С. 11-15.
17. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 1. С. 86-97.
18. Климов В.Г. Применение лазерной импульсной наплавки при разработке технологии восстановления рабочих лопаток турбины газотурбинного двигателя // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 1. С. 170-179.
19. Куренкова В.В., Дорошенко Л.К., Малашенко И.С. Особенности кристаллизации комплекснолегированных припоев для высокотемпературной пайки жаропрочных никелевых сплавов // *Автоматическая сварка*. 2009. № 6. С. 17-26.
20. Tokoro K., Wikstrom N.P., Ojo O.A., Chaturvedi M.C. Variation in diffusion-induced solidification rate of liquated Ni—Cr—B insert during TLP bonding of Waspaloy superalloy // *Materials Science and Engineering A*. 2008. Vol. 477. No. 1-2, pp. 311-318. DOI: 10.1016/j.msea.2007.05.069



## WEAR-RESISTANT COMPOSITES APPLICATION IN REPAIR AND MODIFICATION TECHNOLOGY OF THE GTD ROTOR BLADES

Klimov V.G. \*, Nikitin V.I., Nikitin K.V., Zhatkin S.S., Kogteva A.V.

Samara State Technical University (Samara Polytech),  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Россия

\* e-mail: vadim3945@yandex.ru, v.klimov@uecrus.com

### Abstract

The of production and operation costs of gas turbine engines employed in aviation, oil and gas or energy industries constitutes a significant portion of costs reducing the net marginal profit of operator-enterprises. These costs reduction is a natural desire of any holding. Against this background, the ability to maintain the resource of the gas turbine engine at the lowest cost to itself remains the main criterion of the competitiveness of the producer in the market.

It should be kept in mind, that the operation costs of gas turbine engines through their lifetime cycle often exceed their original cost. To be precise, the effective repair technologies often stops the loss risks in future orders.

A distinctive feature of domestic aviation gas turbine building is a low assigned and overhaul period of the engines operated according to the first performance strategy.

Often the causes of understated life cycles are the imperfections of the structures that occur at the development stage. Consequently, the presence of the extremely expensive parts and units with a relatively short lifetime requires their permanent replacement or recovery. These parts are the rotor blades, and the turbine stator. Many factors can lead to their failure, starting from structure changing due to the uneven temperature fields, to the loss of geometry due to burn-out or mechanical damage. The last one is the factor, most frequently occurred in the products.

From the viewpoint of repairing technologies, the turbine blades recovery is the most cost-effective among all other engine parts. The cost of the engine hot section (turbine) producing exceeds the cost of a cold section (compressor) by average of 400-700%. However, the repair complexity remains the main obstacle in its implementation.

This article proposes to employ the high-temperature nickel powders of the VPR type as wear-resistant surfacing materials applied by laser action. The structure formation peculiarity of the described materials is revealed. It is manifested at high cooling rates in the form of natural composites formation with dispersion eutectic hardening along the boundary of the dendritic framework. This structure has a non-

directional arrangement of strengthening phases that increases the wear-resistant characteristics of the resulting composite.

The original method of restorative surfacing is described. It allows repairing and modifying rotor blades of gas turbine engines (GTE), with increasing the wear-resistant characteristics of the part contact surfaces. Based on the conducted comparative studies, including analysis on a scanning electron microscope; measurement of micro-hardness and the coefficient of the materials linear expansion; testing of abrasion resistance of cladding and their fatigue strength, the possibility of VPR type materials application of as an alternative to classical wear-resistant composites with mechanical admixture of various carbides was proved. It is shown that under conditions of pulsed laser action at high cooling rates, the average hardness and overall resistance to abrasive wear of certain VPr alloys grow due to the formation of a finely dispersed stable eutectic structure close to the initial powder material. The positive performance characteristics of alloys of VPr 11-40N and VPr 27 grades were obtained, which allows employ them when rebuilding the GTE rotor blades.

**Keywords:** Laser powder cladding, a rotor blade GTD, bath powder, micro hardness, microstructure, electron microscopy, local abrasion, natural composite carbide karborid, structural heredity, fatigue tests.

### References

1. Kablov E.N. *Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigatelei: splavy, tekhnologii, pokrytiya* (Cast blades of gas turbine engines: alloys, technologies, coatings), Moscow, Nauka, 2006, 632 p.
2. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Nazarkin P.M. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2013, no. 1, pp. 12-18.
3. Permilovskii I.A., Geichenko V.S., Fruman I.I. *Avtomaticheskaya svarka*, 1976, no. 5, pp. 54-56.
4. Permilovskii I.A., Kazantseva N.A. *Avtomaticheskaya svarka*, 1976, no. 4, pp. 52-54.
5. Kolosov V.I. *Patent RU 2153965 C1*, 27.09.1999.
6. Sorokin L.I. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 7, pp. 20-26.
7. Sorokin L.I., Lukin V.I., Bagdasarov Yu.S. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 6, pp. 12-17.

8. Yilmaz O., Gindy N., Gao J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, vol. 26, no. 2, pp. 190-201. DOI: 10.1016/j.rcim.2009.07.001
9. Huang H., Gong Z.M., Chen X.Q., Zhou L. SMART robotic system for 3D profile turbine vane airfoil repair. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, vol. 21, no. 4, pp. 275-283. DOI: 10.1007/s001700300032
10. Nowotny S., Scharek S., Beyer E., Richter K-N. Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, vol. 16, no. 3, pp. 344-348. DOI: 10.1007/s11666-007-9028-5
11. Wilson J.M., Piya C., Shin Y.C., Zhao F., Ramani K., Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 80, pp. 170-178. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.084
12. Shitarev I.L., Smelov V.G., Sotov A.V. Repair of a gas turbine blade tip by impulse laser build-up welding. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 96-99. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.96
13. Smelov V.G., Sotov A.V., Kosirev S.A. Development of process optimization technology for laser cladding of GTE compressor blades. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, vol. 9, no. 10, pp. 1854-1858.
14. Evgenov A.G., Lukina E.A., Korolev V.A. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, no. 5(23), pp. 3-11.
15. Klimov V.G., Zhatkin S.S., Shchedrin E.Yu., Kogteva A.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 2(4), pp. 782-788.
16. Klimov V.G., Nikitin V.I., Zhatkin S.S. *Liteinoe proizvodstvo*, 2015, no. 12, pp. 11-15.
17. Klimov V.G. Comparison of turbine blade wing of heat-resisting alloy geometry restoring techniques. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 86-97.
18. Klimov V.G. Implementing laser pulse buildup for gte turbine rotor blades reconditioning process design development. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 170-179.
19. Kurenkova V.V., Doroshenko L.K., Malashenko I.S. *Avtomaticheskaya svarka*, 2009, no. 6, pp. 17-26.
20. Tokoro K., Wikstrom N.P., Ojo O.A., Chaturvedi M.C. Variation in diffusion-induced solidification rate of liquated Ni—Cr—B insert during TLP bonding of Waspaloy superalloy. *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol. 477, no. 1-2, pp. 311-318. DOI: 10.1016/j.msea.2007.05.069



Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*  
Художественное оформление *В.И. Володиной, И.В. Романовой*  
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 15.01.2019. Подписано в печать 12.03.2019.  
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 31,15. Уч.-изд. л. 33,50. Тираж 85 экз. Заказ 974/680.

Издательство МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993  
Типография Издательства МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993