

УДК 621.791.725 : 621.431.75 : 669.018.44

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНОГО ПРИПОЯ ВПР11-40Н ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ НА ПЕРО ЛОПАТКИ ГТД

© 2018 В.Г. Климов^{1,2}, В.И. Никитин², С.С. Жаткин², К.В. Никитин², А.В. Когтева^{1,2}

¹АО «Объединённая двигателестроительная корпорация»

²ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Статья поступила в редакцию 25.06.2018

В данной статье рассматривается возможность использования жаропрочных порошковых никелевых материалов типа ВПр в качестве износостойкой наплавки, наносимой при помощи лазерного импульсного излучения. Предложен оригинальный метод восстановительной наплавки, позволяющий производить ремонт и модификацию износостойких характеристик лопаток ротора газотурбинных двигателей (ГТД) с высокой экономической эффективностью. На основе проведенных сравнительных исследований, включающих в себя анализ на растровом сканирующем электронном микроскопе, измерение микротвердости и испытания абразивной стойкости материалов показано, что в условиях импульсного лазерного воздействия при высокой скорости охлаждения растёт средняя твёрдость матрицы и общая стойкость к абразивному износу сплава ВПр11-40Н.

Ключевые слова: лазерная порошковая наплавка, лопатка ротора ГТД, порошковая ванна, микротвердость, электронная микроскопия, локальный абразивный износ, карбид, карбоборид.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на постоянный прогресс в технологии изготовления лопаток ГТД, она остается крайне затратной, а ресурс работы газовой турбины напрямую зависит от условий её эксплуатации и за счет износа лопаток остается невысоким. Даже небольшая потеря геометрии пера лопатки ротора турбины в процессе эксплуатации и износа значительно снижает КПД двигателя в целом. Длительная эксплуатация двигателя в тяжёлых условиях может приводить к практически полной замене лопаток нескольких ступеней ротора как компрессора, так и турбины [1].

На данный момент существуют различные способы восстановления геометрии лопаток ГТД. Широко распространен метод дуговой на-

плавки, описанный ещё в 1976г. 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») [2-5]. В настоящее время практически все существующие на территории России технологии ремонта лопаток ГТД построены на методе дуговой наплавки в защитных газах, ввиду его простоты, доступности и низких затрат на оборудование.

Однако для метода дуговой наплавки характерен ряд недостатков, таких как большая зона термического влияния и сложность при наплавке краевых элементов. Вследствие этого дуговая наплавка в среде защитного газа не получила широкое распространение при восстановлении дефектных мест жаропрочных лопаток из литейных сплавов. Перегрев лопатки от электрической дуги в зоне термического влияния образует область коагуляции и распада γ' -фазы интерметаллида Ni₃Al. Данный интерметаллид является основой жаропрочных свойств большинства деталей газовых турбин, производимых серийно.

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 [1].

Различные способы избежать образования трещин в зоне наплавки были описаны в работе Л.И. Сорокина (ФГУП «ВИАМ»), но также даже

Климов Вадим Геннадьевич, аспирант кафедры ЛиВТ ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ).

E-mail: vadim3945@yandex.ru, v.klimov@uecrus.com

Никитин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ЛиВТ ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Жаткин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры литеинных и высокоеффективных технологий, ФГБОУ ВО «СамГТУ».

E-mail: laser@samgtu.ru, sergejat@mail.ru

Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, декан факультета ФММиТ ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Когтева Александра Владимировна, аспирант кафедры ЛиВТ ФГБОУ ВО «СамГТУ».

самим автором отмечается сложность применения подобной технологии, что ограничивает её использование на производстве. Помимо прочего данная технология не предотвращает распад упрочняющей интерметаллидной фазы [6]. Однако до настоящего времени, даже с началом применения в производстве новых прогрессивных технологий, к которым относится лазерная наплавка, большинство авторов отмечают тот же фактор, который подчеркнул в своих тезисах Л.И. Сорокин в 1997 году. Для снижения риска образования трещин в подложке жаропрочного сплава на основе Ni и уменьшения коагуляции γ' -фазы Ni_3Al необходимо минимизировать зону термического влияния (ЗТВ), не допускать перегрева подложки выше 1395 °C при наплавке и производить подогрев подложки для снижения внутренних растягивающих напряжений [7-13].

Пути достижения данного эффекта достаточно сложны. Использование теплоотводящей оснастки снижает эффект подогрева подложки, как и охлаждение защитными газами, однако большой перегрев приводит к распаду интерметаллида Ni_3Al и снижению прочностных характеристик сплава. Учитывая высокую теплопроводность жаропрочных сплавов на основе Ni (более 90 Вт/(м·К)), стабильное протекание процесса наплавки обеспечивается локализацией зоны нагрева и ограничение энергии тепловложения по времени за счёт применения определённых источников нагрева, с одновременным сохранением температуры подложки в горячем состоянии. Наибольшей степенью контроля этих факторов обладает метод лазерной импульсной наплавки, который, помимо прочего даёт возможность регулировки в широком диапазоне параметров лазерного излучения при нанесении материала присадки на подложку.

В данной работе объектом исследования являлись лопатки ротора турбины турбостартера (ТС) авиационного ГТД НК-12МП, которые получают методом литья в керамические оболочки формы с равноосной кристаллизацией из сплава ЖС6-К (ТУ 1-809-1025-98, табл. 1). Износ лопатки ТС происходит по торцу пера лопатки и имеет абразивный характер, согласно ранее опубликованным материалам [14]. На основании вышеизложенного при восстановлении

геометрии пера была поставлена задача повышения стойкости его торцевой кромки к абразивному износу.

В ранее опубликованных работах рассматривались различные присадочные материалы для восстановления пера лопаток, среди которых порошковые высокотемпературные никелевые материалы типа ВПр, разработанные ФГУП «ВИАМ» (г. Москва), и композитный порошковый материал из серии «Сфекорд Рок-Дюр» производства ООО «СП Техникорд» (г. Москва). Была определена возможность использования высокотемпературных никелевых припоеv ВПр в качестве материала для износостойких наплавок, как альтернатива классическим композитам с примесью карбида вольфрама («Сфекорд Рок-Дюр»). По результатам анализа и исследований для дальнейшей апробации был выбран материал ВПр11-40Н (ТУ 1-809-108-91, табл. 1) [14-17].

Разрабатываемая технология предполагает применение импульсной лазерной наплавки, производимой на установке ALFA-300 (изготовитель ООО «ЛазерФорм», г. Зеленоград, Россия). Для восстановления серийных лопаток ТС, способ наплавки был оптимизирован и доработан (относительно описываемого ранее [14-17]), была разработана универсальная модульная оснастка, представленная на рис. 1.

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» СамГТУ на установке Универсал-1А, обеспечивающей через систему датчиков и средств регистрации непрерывный контроль нормальной нагрузки и момента трения. Испытания проводились в течение 15 минут локально в участке зоны наплавки, материал контроллера – трубка из стали 40Х (закалка до HRC 46-48) с внешним диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм. Применялась нормальная нагрузка в 30 кгс

Таблица 1. Классификация и рабочая температура материалов

Материал	ГОСТ, ТУ	Классификация	Основные компоненты	Рабочая температура, °C
ЖС6-К	ТУ 1-809-1025-98	Жаропрочный литейный сплав	Ni-Cr-Al-W-Mo-Co-Ti-Si-C	до 1000
ВПр11-40Н	ТУ 1-809-108-91	Высокотемпературный порошковый припой	60% (Ni-Cr-Al-Fe-Co-B-Si-C) + 40% (Ni-B-Si)	до 900

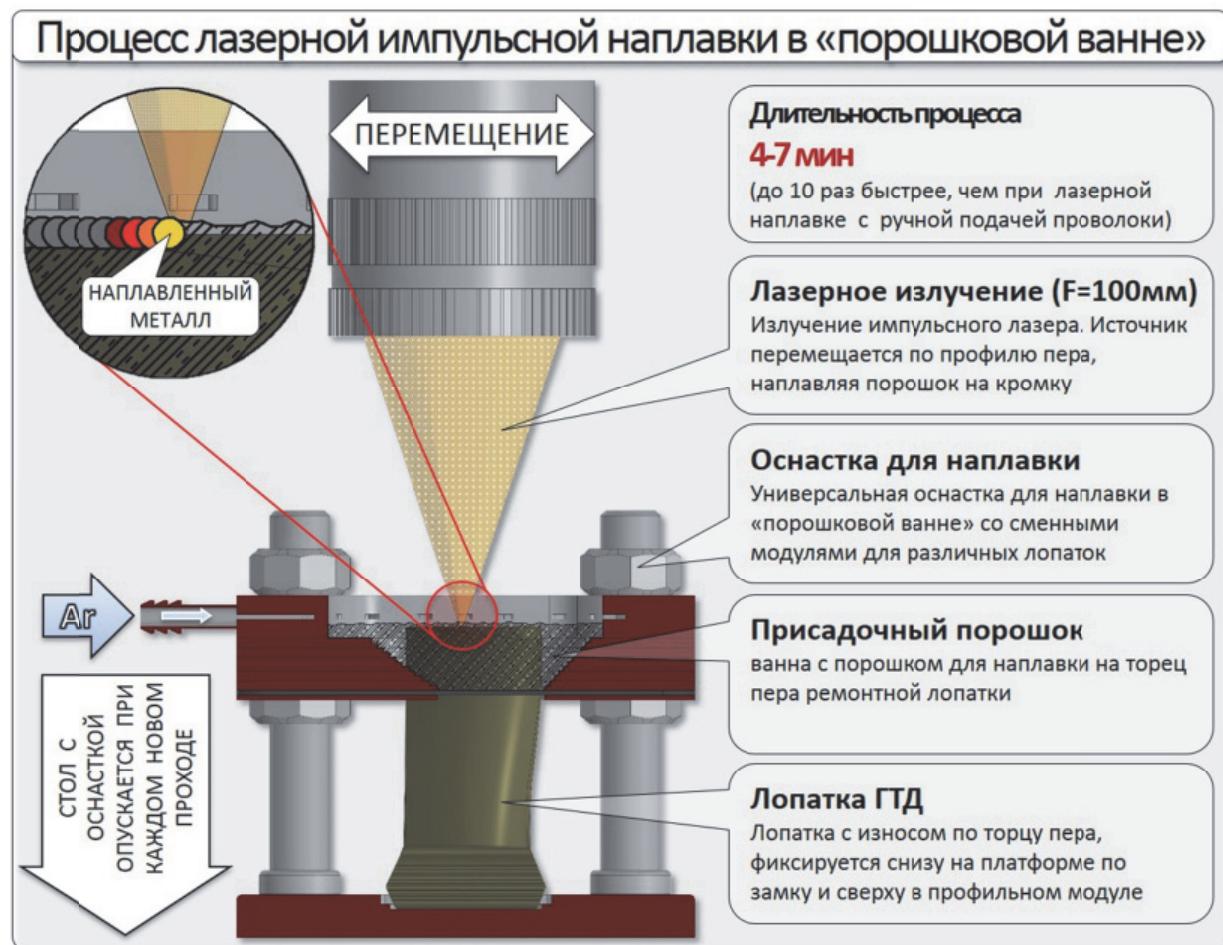


Рис. 1. Процесс лазерной импульсной наплавки в «Порошковой ванне» с применением универсальной модульной оснастки

с частотой вращения шпинделя 600 об/мин. В качестве среды использовалась алмазная паста АСМ-3/2-НОМГ, соответственно износ образца осуществлялся алмазным порошком дисперсностью 2-3 мкм. Площадь трения составляла $1,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

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 Tetrix 350 AC/DC (Firma EWM AG, Германия);
- Лазерная импульсная наплавка на установке ALFA-300 (изготовитель ООО «ЛазерФорм», г. Зеленоград, Россия);
- Газовая атомизация струй холодного газа на атомайзере EIGA 50/500 (Firma ALD, Германия).

На рис. 2 представлены результаты электронного микроскопического исследования полученных образцов с указанием твердости зоны наплавки (матрицы) в зависимости от скорости охлаждения расплава ВПр11-40Н. Диапазон скоростей охлаждения в зависимости от метода нанесения покрытия указан в верхней части непосредственно над микроструктурой полученных зон. Под снимками указано среднее значение микротвёрдости матрицы сплава ВПр11-40Н в зависимости от метода нанесения.

Основываясь на результатах 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 частиц, которую можно проследить по ярко выраженной ликвации Cr, прослеживаемой по карте распределения элементов (рис.2). С повышением скорости охлаждения, уровень ликвации заметно снижается и Cr насыщает матрицу сплава. Данный фактор должен положительно сказываться на жаростойких свойствах полученных наплавок, ввиду того что Cr наряду с Al снижает влияние

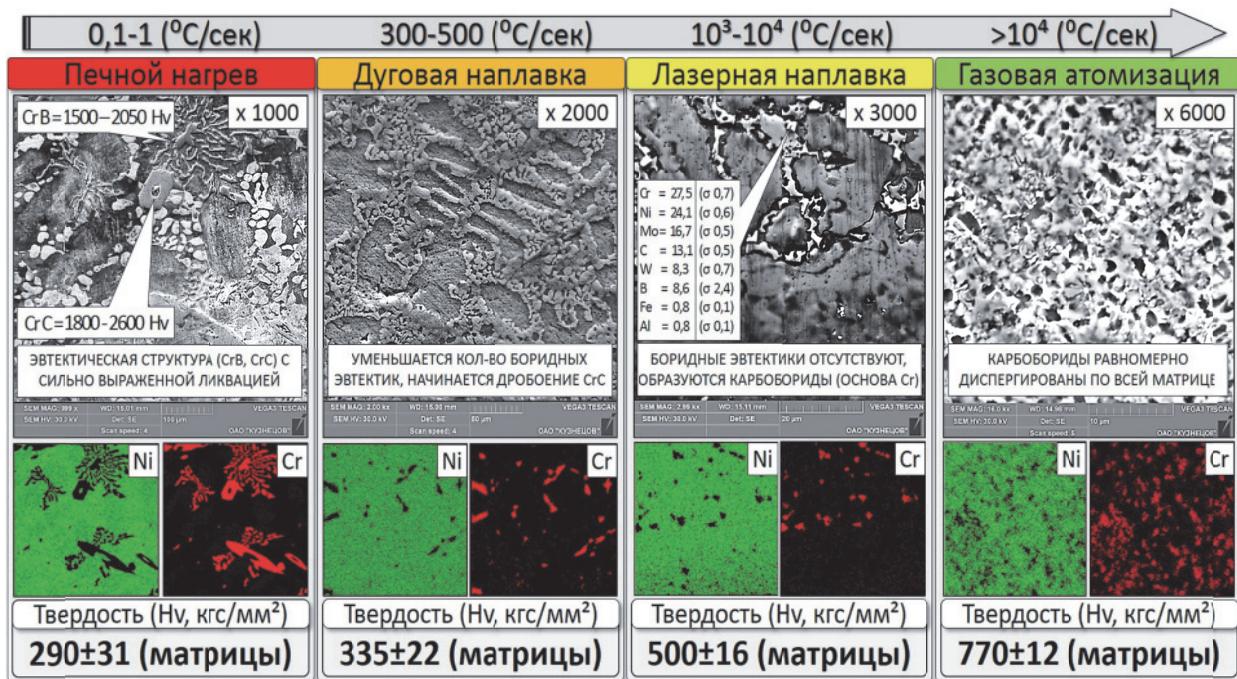


Рис. 2. Микроструктура и микротвёрдость материала ВПр11-40Н в зависимости от скорости охлаждения расплава при различных методах нанесения покрытия

высокотемпературной коррозии при работе лопаток в среде горячих газов.

Низкую твёрдость матрицы ВПр11-40Н при печеном нагреве можно объяснить ярко выраженной эвтектической структурой с большим содержанием карбидов CrC (HV=1800-2600 кгс/мм²) и боридных эвтектик CrB (HV=1600-2050 кгс/мм²), отличающихся значительной твёрдостью. Однако помимо большой твёрдости боридные эвтектики значительно охрупчивают закристаллизовавшийся расплав, а учитывая их легкоплавкость – повышает риск оплавления их при термообработках или нагреве при работе в горячих газах. Интенсивно дифундируя в основной металл, бор вызывает эрозию материала подложки [18].

С ростом скоростей охлаждения и ликвации сплава, боридные эвтектики не успевают образовываться в расплаве, бор связывается в более равновесные и стабильные соединение карбоборидов, кристаллизующихся на первичных интерметаллидах. Их химический состав близок к соединениям типа $\text{Me}_6\text{C}_5\text{B}_3$ и $\text{Me}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ они имеют большую область гомогенности, когда происходит замещение атомов углерода бором.

Стоит учесть, что все рассматриваемые образцы ВПр11-40Н имеют высокие показатели стойкости к износу и по сравнению с другими жаропрочными сплавами показывают значительно более высокую износстойкость. 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. 3 в графиках показаны зависимости различных параметров (стойкость к абра-

зивному износу, средняя твёрдость матрицы и размер твёрдых соединений с Cr (карбидов Cr, сложных карбидов и карбоборидов на основе Cr) от скорости остывания расплава ВПр11-40Н. Необходимо обратить внимание, что большинство образуемых на высоких скоростях охлаждения соединений с Cr, отвечающих за стойкость сплава к износу, являются термостабильными с температурой плавления более 1900 °C и предположительно будут сохранять свои полезные свойства и при длительных воздействиях рабочих температур в составе двигателя. Малый размер упрочняющей фазы, формируемый лазерным излучением, и равномерное её диспергирование по матрице наплавки даёт достаточно высокую среднюю твёрдость и высокие параметры сопротивления к износу, что, учитывая малою область соприкосновения на торце пера лопатки к ответному телу, можно считать дополнительным положительным фактором.

ВЫВОДЫ

1. Метод лазерной импульсной наплавки формирует мелкодисперсную структуру сплава ВПр11-40Н близкую к структуре, получаемой при распылении методом газовой атомизации.
2. Повышение скорости охлаждения расплава материала ВПр11-40Н приводит к резкому снижению размера частиц карбидной и карбоборидной фазы Cr и их равномерному распределению по матрице наплавки.
3. С ростом скорости охлаждения повышается содержание Cr в матрице сплава и снижается общая ликвация химического состава, что полу-

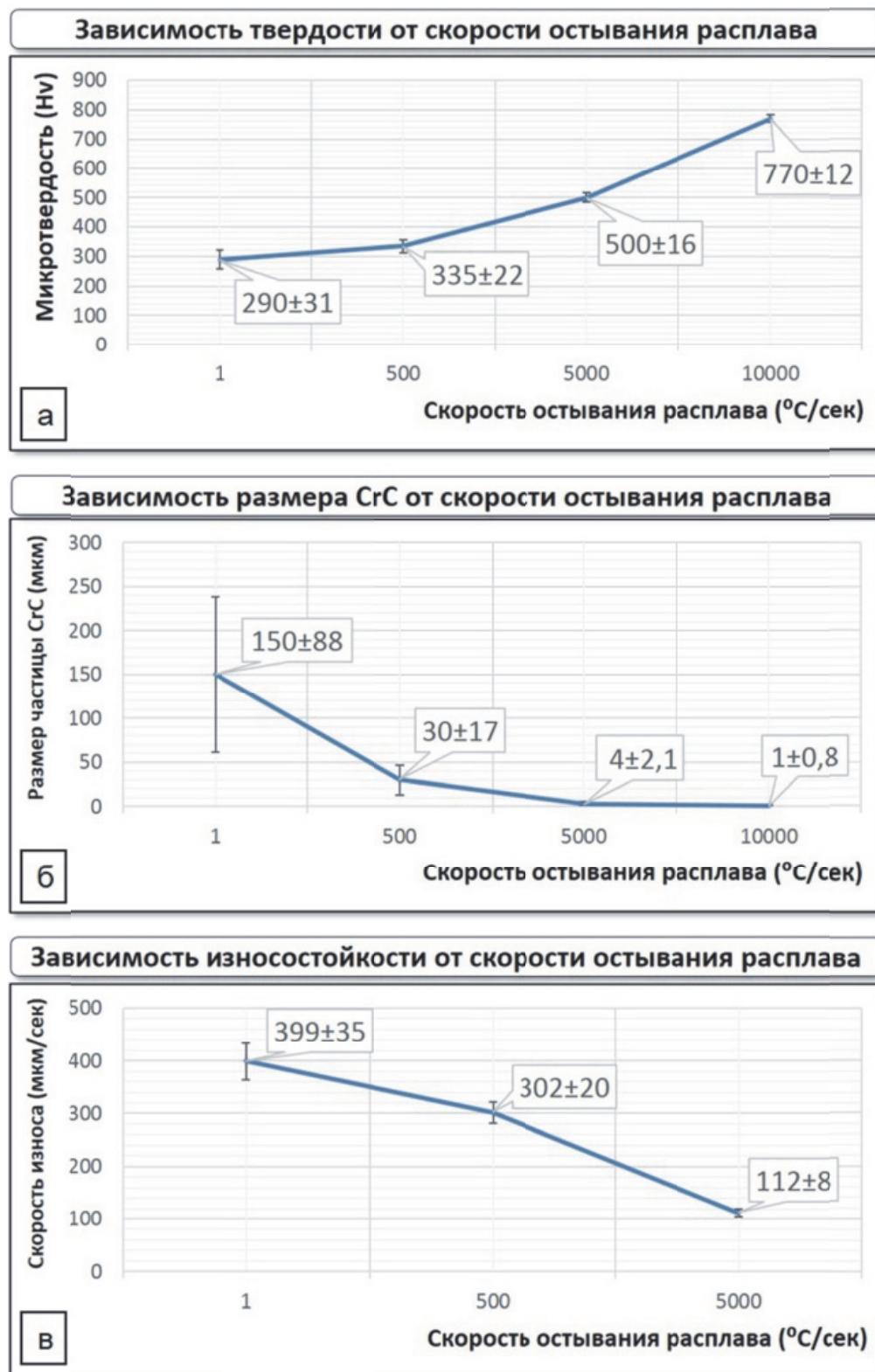


Рис. 3. Различные зависимости от скорости охлаждения расплава ВПр11-40Н:
а – микротвердости матрицы материала; б – размера упрочняющих соединений на основе Cr;
в – стойкости к абразивному износу сплава.

жительно сказывается на жаростойкости материала ВПр11-40Н.

4. С ростом скорости охлаждения растёт средняя твёрдость матрицы и общая стойкость к абразивному износу сплава ВПр11-40Н.

5. Широкий диапазон механических ха-

рактеристик сплава ВПр11-40Н, напрямую зависящих от формируемой литой структуры и скорости охлаждения расплава, говорит о возможности их контроля и управления путём правильного выбора режимов лазерного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Пермиловский И.А., В Гейченко.С., Фруман И.И. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей // Автоматическая сварка. 1976. №5. С. 54–56.
3. Пермиловский И.А., Казанцева Н.А. Физико-механические свойства наплавленных карбидохромовых сплавов // Автоматическая сварка. 1976. №4. С. 52–54.
4. В.И. Колесов. Способ восстановления длины пера лопаток компрессора газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления. РФ. Патент 1, 2153965. (2000).
5. Сорокин Л.И. Аргонодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. 2004. № 7. С. 20-26.
6. Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 // Сварочное производство. 1997. № 6. С. 12-17.
7. Yilmaz O., Gindy N., Gao J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components // Robot Comput Integr Manuf (Robotics and Computer-Integrated Manufacturing), 26(2) (2010), pp. 190-201.
8. Huang H., Gong Z.M., Chen X.Q., Zhou L. SMART robotic system for 3D profile turbine vane airfoil repair // Int J Adv Manuf Technol [International Journal of Advanced Manufacturing Technology], 21(4) (2003), pp. 275-283.
9. Nowotny S., Scharek S., Beyer E., Richter K-N. Laser beam build-up welding: Precision in re-pair, surface cladding, and direct 3D metal deposition // Journal of Thermal Spray Technology, 16(3) (2007), pp. 344-348.
10. 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, 80 (2014), pp. 170-178.
11. 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, 682 (2014), pp. 96-99.
12. 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 9(10) 2014, pp. 1854-1858.
13. Евгеньев 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.
14. 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.
15. Климов В.Г., Никитин В.И., Жаткин С.С. Восстановление высоты пера лопаток ГТД высокотемпературными порошковыми припоями // Литейное производство. 2016. № 12. С. 8-12.
16. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2016. № 1. С. 86-97.
17. 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.
18. Куренкова В.В., Дорошенко Л.К., Малащенко И.С. Особенности кристаллизации комплекснолегированных припоеv для высокотемпературной пайки жаропрочных никелевых сплавов // Автоматическая сварка. 2009. № 6. С. 17-26.

FEATURES OF FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF HEAT RESISTING Vpr11-40h SOLDER AT LASER CLADING ON THE SHOVEL FEATHER GTE

© 2018 V.G. Klimov, V.I. Nikitin, S.S. Zhatkin, K.V. Nikitin, A.V. Kogteva

Samara State Technical University

This article discusses the possibility of using heat-resistant Nickel powder materials such as VPR as a wear-resistant cladding applied by means of laser pulsed radiation. An original method of recovery cladding is proposed, which allows to repair and modify the wear-resistant characteristics of the rotor blades of gas turbine engines (hereinafter – GTE) with high economic efficiency. On the basis of the carried out comparative researches including the analysis on the raster scanning electron microscope, research of world-hardness, tests of abrasive durability of materials.

Keywords: laser powder cladding, blade of the rotor GTE, powder bath, microhardness, electron microscopy, local abrasive wear, carbide, carbaborite.

Vadim Klimov, Post-Graduate Student of the Department Foundry and High-Efficiency Technologies (FaHT) of the Samara State Technical University (SamSTU).
E-mail: vadim3945@yandex.ru v.klimov@uecrus.com
Vladimir Nikitin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of FaHT of the SamSTU.
Sergey Jatkin, Ph. D., Associate Professor in the Department

of FaHT of the SamSTU.
E-mail: laser@samgtu.ru sergejat@mail.ru
Konstantin Nikitin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of FMMT of the SamSTU.
Aleksandra Kogteva, Post-Graduate Student of the Department of FaHT of the SamSTU.