



УДК 621.791.92:526.001.4

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ АРГОНОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ И НАНЕСЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ. Часть 2

А.Ф. Белявин, Д.А. Федотов, В.В. Куренкова, Д.П. Хомич

ИЦ «Пратт и Уитни-Патон».  
03150, г. Киев, ул. Горького, 68. E-mail: vkurenkova@pwpaton.com

Исследован выбор присадочного материала для восстановления торцевых кромок пера рабочих лопаток из монокристалльного сплава CMSX-4 способом аргонодуговой наплавки. Наплавляемый материал (сплав IN625) обеспечивает торцевой кромке пера рабочей лопатки необходимые стойкость против окисления и коррозии, а также сопротивление ползучести при рабочей температуре, позволяет формировать наплавленные швы без горячих трещин с минимальным количеством зерен случайной ориентации. Разработан подход к комплексному ремонту рабочих лопаток из сплава CMSX-4, включающий восстановление торца пера наплавкой и нанесение на изделие способом электронно-лучевого осаждения жаростойкого подслоя и теплозащитного покрытия, включая проведение всех необходимых видов термомеханической обработки для продления срока службы ответственных изделий ГТД. Библиогр. 4, табл. 2, ил. 7.

**Ключевые слова:** монокристалльный сплав; ориентация; зерна случайной ориентации; дисперсионно-упрочняемые сплавы; зона термического влияния; дендритный рост; наплавленный металл; жаростойкое покрытие; диффузионная зона; теплозащитное покрытие

Структура монокристалльного сплава CMSX-4 представляет собой матричный  $\gamma$ -раствор, упрочненный  $\gamma'$ -фазой. При длительных высокотемпературных испытаниях частицы упрочняющей  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al фазы коагулируют с изменением морфологии и образованием так называемой рафт-структуры. При приложенном извне напряжении вдоль оси монокристалла с ориентацией  $\langle 001 \rangle$  частицы  $\gamma'$ -фазы срстаются друг с другом, образуя пластины, ориентированные перпендикулярно направлению приложенного напряжения (оси Z лопатки) [1]. Для моделирования процесса восстановления торцевой кромки пера рабочей лопатки из монокристалльного сплава CMSX-4 способом ТИГ применяли два типа присадочного материала — сплавы Rene-41 и IN625. Непосредственно после наплавки ТИГ структуру многопроходных швов изучали в различных сечениях в поперечном и продольном направлениях (рис. 1).

В процессе наплавки с применением проволоки из сплава IN625 сформирована достаточно плотная структура многопроходного шва. При этом отмечено сохранение направления роста монокристалльной

основы. Почти 3/4 высоты валика шва имело дендритное строение. При плоском фронте кристаллизации и поэтапном наплавлении присадки в каждом из последующих проходов область с зернами случайной ориентации (ЗСО) смещалась в верх шва, уступая место строго ориентированной структуре (рис. 1, а-г). Следовательно, происходило замещение нежелательной зоны с ЗСО монокристалльной областью, а большеугловые границы зерен обнаружены лишь на высоте 2,8...3,0 мм от линии сплавления шва.

Таким образом, при аргонодуговой импульсной наплавке в случае однонаправленного теплоотвода происходило формирование относительно совершенной направленной ростовой структуры металла шва. При равномерном распределении дислокаций в центре наплавленного шва образовалась субзеренная структура с малыми углами разориентировки между элементами структуры, т. е. полученная структура была близка к монокристалльной [2].

На рис. 1, д, е показано поперечное сечение шва, наплавленного по торцу пера фрагмента лопатки с

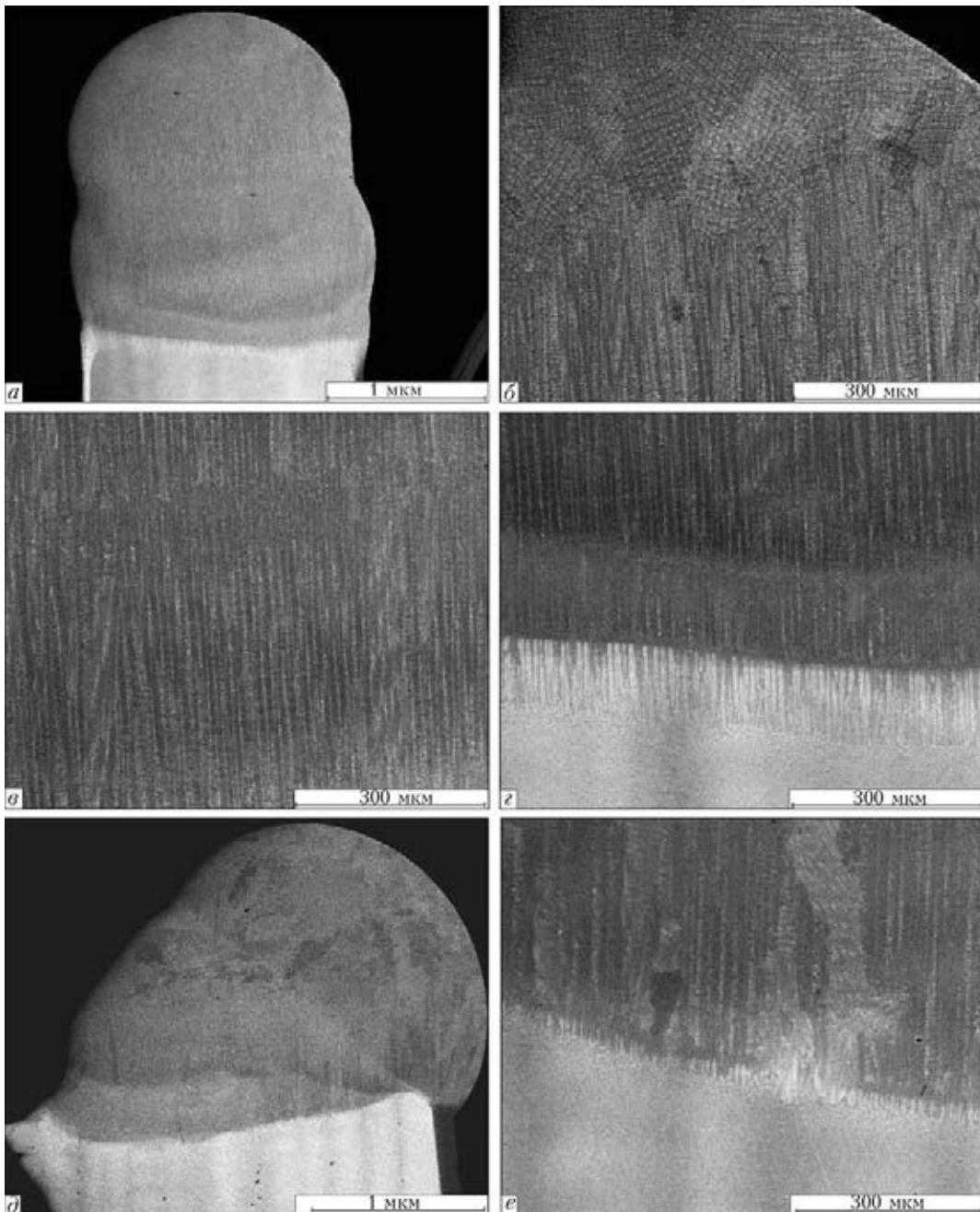


Рис. 1. Микроструктуры многопроходных наплавленных швов, сформированных по торцу лопатки с применением присадочного материала IN625 (а-г) и Rene-142 (д, е); а, д — общий вид; г, е — линии сплавления; б, в — верхняя и средняя часть швов

применением присадочной проволоки из сплава Rene-41. Очевидно, что неплоский фронт кристаллизации, глубокая ванна, несовершенство структуры подложки (наличие на боковой поверхности остатков жаростойкого покрытия) и изменение плоскости движения источника наплавки способствовали формированию ЗСО как вдоль линии сплавления, так и по центру шва. Следовательно, при нарушении симметричных условий кристаллизации происходила асимметричная кристаллизация металла шва [3]. В центральной и верхней части шва образовалась зона равноосных кристаллов, формирующихся в условиях естественной кристаллизации со значительной ликвационной неоднородностью.

На структурообразование в кристаллизующемся металле шва влияет химический состав присадоч-

ного материала. В случае применения сплава Rene-41 с содержанием  $\Sigma Al + Ti = 4,75$  мас. % наличие ЗСО нежелательно ввиду восприимчивости данного сплава к возникновению трещин дисперсионного твердения [3]. Наличие в составе данного присадочного материала 3,14 мас.% Ti не являлось позитивным при наплавке торцевой кромки, поскольку титан, отличаясь большим сродством к кислороду, образует нестойкую оксидную пленку  $TiO_2$ , снижая окалинстойкость материала.

Применение для наплавки сплава IN625 позволило не только обеспечить коррозионную стойкость и жаростойкость при высокой температуре наплавленному материалу торцевой кромки. Химия сплава дает возможность разбавить высоколегированную



сварочную (наплавочную) ванну никелем и хромом, уменьшая при этом количество элементов, стабилизирующих  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al фазу. Минимальная массовая доля углерода в IN625 ( $\leq 0,05\%$ ) благоприятно влияет на совместимость монокристалльной подложки и наплавляемого материала и предотвращает образование в металле наплавки вторичных фаз типа карбидов в междендритных областях. Большая однородность шва отмечается именно в случае применения в качестве материала наплавки сплава IN625, что наглядно следует из распределения микротвердости по глубине шва [4].

Импульсный режим ведения наплавки позволяет осуществлять регулируемое тепловложение, управлять режимом плавления, формированием структуры металла шва и зоны термического влияния. При использовании импульсной технологии сварки в зоне сварного соединения формируются более дисперсные структуры, чем при стационарном режиме ТИГ. Снижение до минимума погонной энергии за счет создания импульсной дуги и сокращение скорости сварки — основные технологические способы создания плоского фронта кристаллизации в процессе наплавки.

В ходе экспериментов по наплавке образцов и сегментов лопаток из монокристалльного сплава CMSX-4 оптимизированы основные параметры процесса. Необходимую высоту наплавки получали

в результате оптимального количества присадочно-го материала и скорости ведения процесса 2,4 м/ч. При выбранных параметрах процесса аргонодуговой сварки во всех шести пробных наплавленных образцах и готовой лопатке сохранялась кристаллографическая ориентация исходной детали: в нижней части швов формировалась монокристалльная структура наплавленного материала. Капиллярный контроль подтвердил отсутствие в наплавленных швах поперечных сварочных трещин, характерных для швов на монокристалльных сплавах.

**Наплавка торца рабочей лопатки 1-й ступени турбины.** Оптимизации режимов аргонодуговой наплавки на монокристалле завершили проведение комплексного ремонта рабочей лопатки 1-й ступени ГТД. Ремонтруемая лопатка поступила на восстановление после эксплуатации приблизительно 24...32 тыс. ч в составе турбины. На торцевой кромке пера отмечен износ за счет контакта с лабиринтным уплотнением сектора, имелись также коррозионно-эрозионные повреждения основы (рис. 2, *a*). Ремонт изделия заключался в восстановлении поврежденного торца способом наплавки ТИГ с применением материала, характеризующегося удовлетворительным сопротивлением против окисления и сульфидно-оксидной коррозии при рабочей температуре.

На поступившем изделии выполнен полный цикл механических операций по удалению повреж-

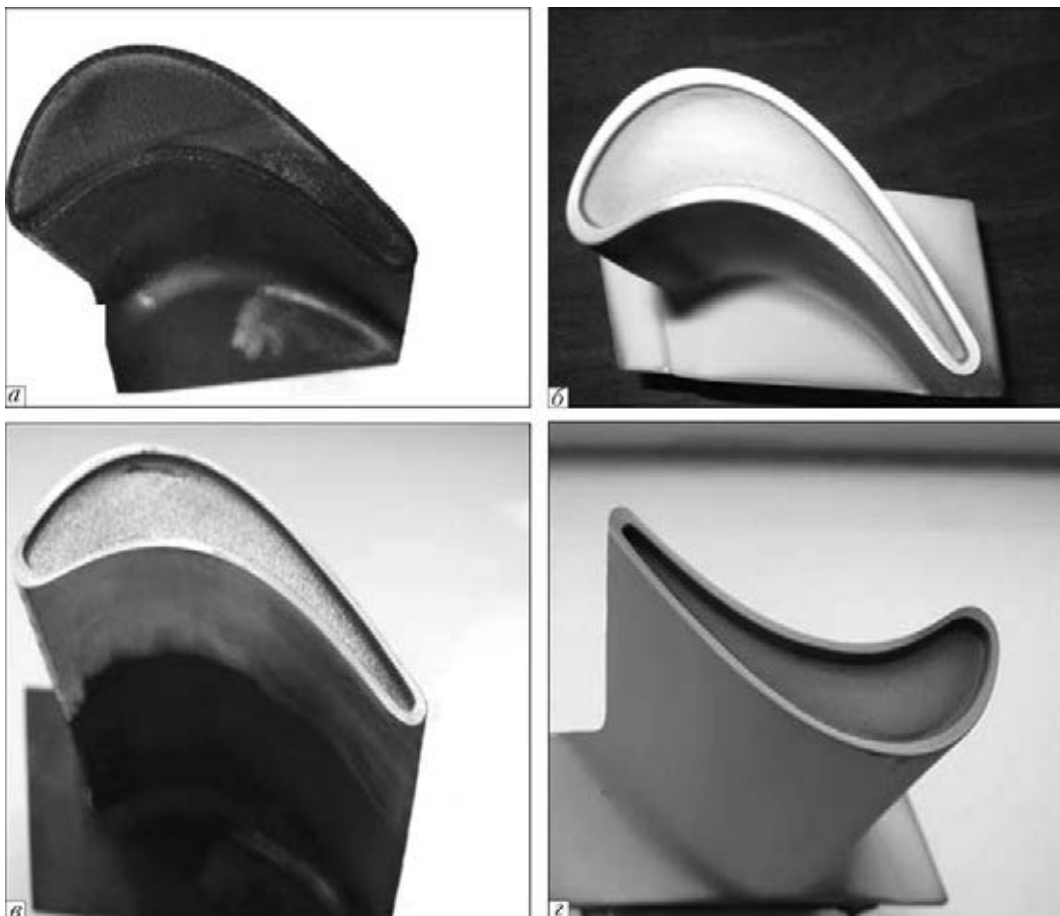


Рис. 2. Внешний вид рабочей лопатки энергетической турбины на различных этапах восстановления: *a* — после эксплуатации с повреждением торцевой кромки; *b*, *c* — после нанесения теплозащитного покрытия; *d* — после наплавки и шлифовки

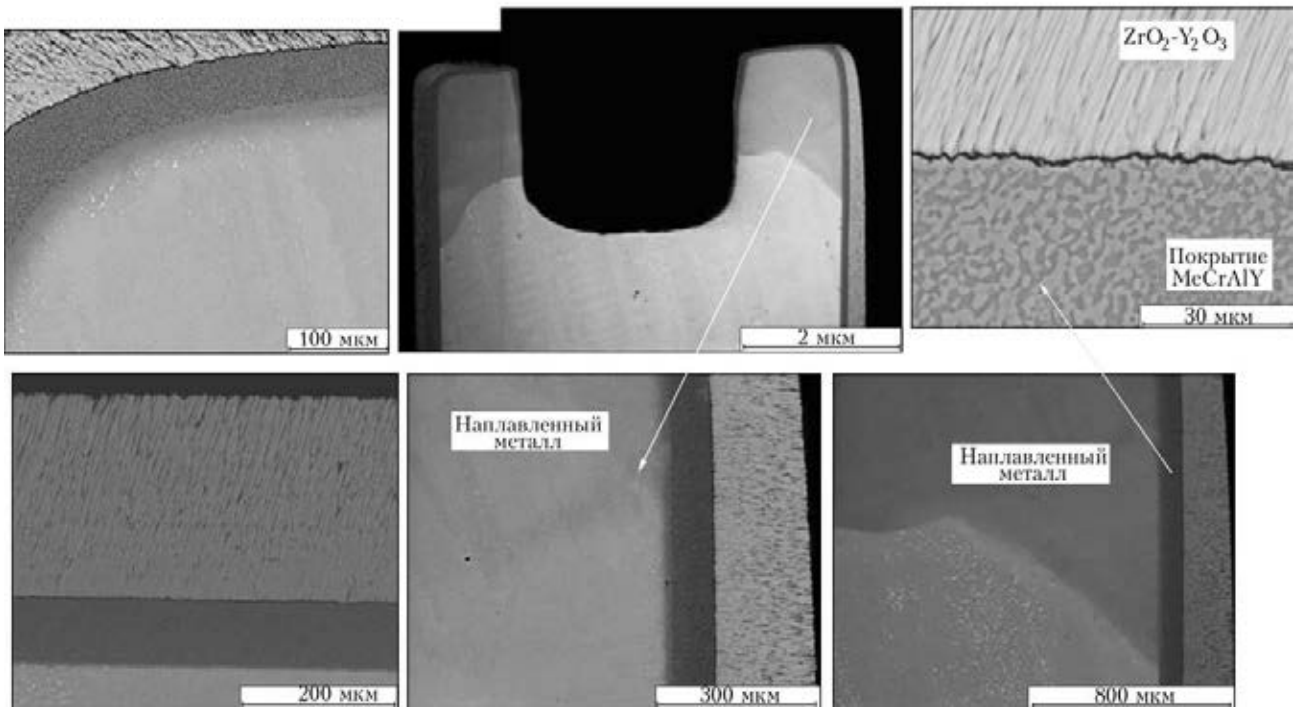


Рис. 3. Микроструктура межфазных границ в области ремонтной зоны с осажженным покрытием NiCoCrAlY\ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) после отжига при 870 °С (20 ч) на торцевой кромке пера рабочей лопатки

денного материала и подготовке поверхности (шлифованием). Восстановительную наплавку выполняли способом ТИГ в аргоне (сварочный источник «НОВАРТ 120») при скорости 2,4 м/ч.

В качестве присадочного материала использовали проволоку, соответствующую сплаву IN625. После многопроходной наплавки (высота шва до 3 мм) изделие обрабатывали в размер и формировали требуемую конфигурацию профиля торца с применением электроэрозионного и плоскошлифовального видов обработки. Высота наплавленного слоя после обработки на шлифовальном станке составляла 1,5...1,8 мм (рис. 2, б). Капиллярный контроль сформированного торца лопатки показал наличие двух линейных дефектов на межфазной границе перфорационного отверстия со сварочным швом и точечный дефект в углублении торца (реборды пера) лопатки.

Затем на трактовую поверхность лопатки способом электронно-лучевого осаждения в вакууме на-

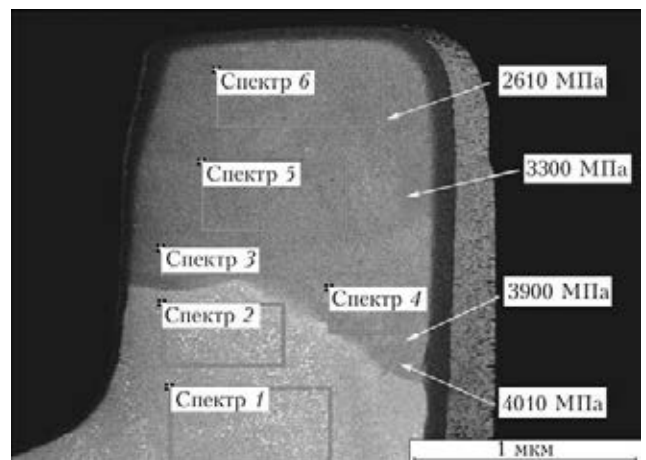


Рис. 4. Микроструктура и микротвердость металла, наплавленного с применением присадочной проволоки IN625 и нанесенным ТЭП

носили жаростойкое покрытие NiCoCrAlY и теплозащитный слой ZrO<sub>2</sub>-7 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 2, в, г).

Таблица 1. Химический состав наплавленного металла шва на рабочей лопатке, сформированный с применением присадочной проволоки IN 625 и нанесенным ТЭП

№ спектра	Массовая доля компонентов, %									
	Al	Si	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	Ta	W	Re
Спектр 1	5,27	–	0,91	6,73	9,69	60,50	–	5,57	8,25	3,06
Спектр 2	4,96	–	0,88	6,50	10,05	59,79	–	5,91	7,14	4,77
Спектр 3	1,57	0,61	0,53	19,77	2,37	65,44	5,32	1,25	1,53	1,61
Спектр 4	2,49	0,64	0,53	16,52	4,07	64,98	4,01	1,99	2,44	2,32
Спектр 5	1,27	0,40	0,40	20,53	1,60	66,78	5,85	0,49	1,94	0,75
Спектр 6	0,59	–	–	22,93	0,22	67,82	6,57	0,54	1,05	0,28

Таблица 2. Химический состав металла в окрестности межфазной границы CMSX-4/IN625/NiCoCrAlY в отреставрированной лопатке

№ спектра	Массовая доля компонентов, %								
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	Ta	W	Re
Спектр 1	5,5	1,11	6,22	9,88	60,51	–	6,68	7,14	2,95
Спектр 2	5,16	1,08	6,75	9,67	59,74	–	6,33	7,45	3,81
Спектр 3	2,33	0,57	17,25	3,57	62,95	4,66	3,05	3,1	2,52
Спектр 4	2,46	0,85	16,25	3,83	64,93	4,64	2,62	4,43	–
Спектр 5	10,78	–	14,31	22,98	51,36	–	–	0,58	–
Спектр 6	5,48	–	18,1	24,25	49,36	0,47	0,48	1,29	0,57

После нанесения связующего металлического покрытия, обработки его поверхности на пневмодинамической установке микрошариками и отжига в вакууме по штатному режиму никаких дефектов на металле восстановленной кромки не выявлено, как и после полного цикла нанесения ТЗП с последующим окончательным старением при 870 °С (20 ч).

Структурные исследования по оценке состояния и качества ремонтной зоны, наплавленной ТИГ, производили в состоянии после наплавки, нанесения ТЗП и старения. Микроструктура шва отличалась достаточной плотностью, бездефектностью и сохраняла преимущественно ориентацию роста монокристалльной основы (рис. 3). Кристаллизационные трещины или какие-либо другие сварочные дефекты в структуре наплавленного металла отсутствовали.

Химический состав наплавленного металла шва соответствовал композиции наплавляемых сплавов IN625 и CMSX-4. В результате нанесения ТЗП и финишной термообработки состав металла ремонтной зоны выравнивался, но химический состав металла вершины шва соответствовал сплаву IN625, микротвердость которого составляла приблизительно 2650 МПа (табл. 1, рис. 4).

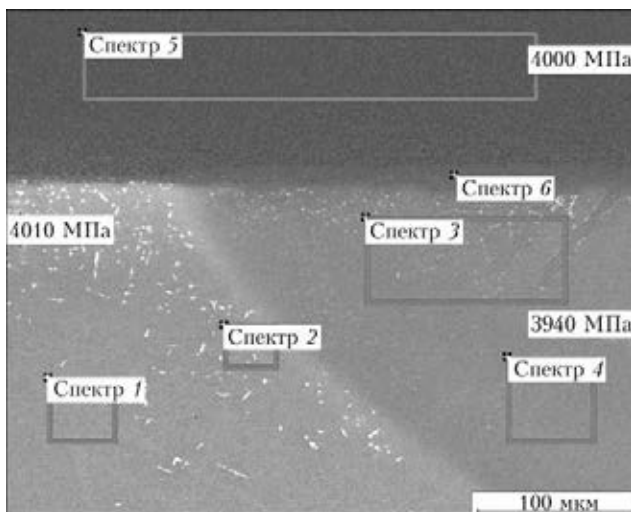


Рис. 5. Микроструктура и микротвердость металла в окрестности межфазной границы CMSX-4/IN625/NiCoCrAlY в отреставрированной лопатке

Металлографические исследования показали хорошую совместимость материалов основы, наплавки и жаростойкого покрытия, обусловленную близостью значений термических коэффициентов линейного расширения  $(12,4...13,5) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (рис. 3, 5, табл. 2). Диффузионная зона между материалом наплавки и покрытием NiCoCrAlY на основе  $\gamma$ -матричного раствора и интерметаллида  $\beta$ -(Ni, Co)Al не превышала 10...15 мкм и не содержала грубых вторичных фаз или эвтектик. Зона термического влияния в CMSX-4 в результате наплавки торца составляла 200...450 мкм и не имела каких-либо дефектов типа рекристаллизации основы, пористости, наличия горячих трещин и др.

Результаты измерения микротвердости наплавленного металла шва непосредственно после ТИГ и полного цикла нанесения ТЗП, а также окончательного старения показаны на рис. 6. После ТИГ в наплавленном шве на границе сплавления присутствовала зона металла с повышенной микротвердостью и максимальными термическими напряжениями.

В результате термообработки (отжиг при 1080 °С, 4 ч и старение при 870 °С, 20 ч) остаточные сварочные напряжения уменьшаются, структура шва выравнивается, из пересыщенного твердого раствора выделяется  $\gamma'$ -фаза, упрочняющая никелевый жаропрочный сплав. Это приводит к снижению

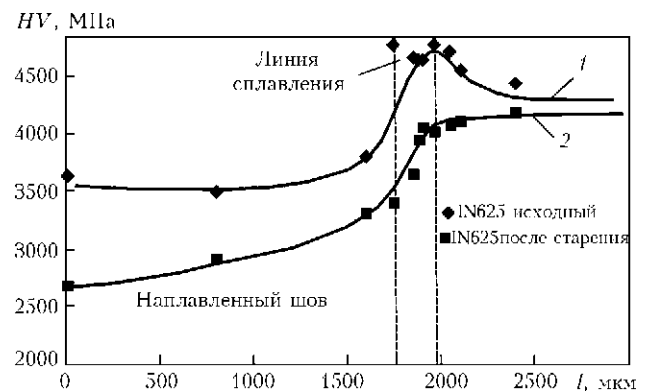


Рис. 6. Распределение микротвердости HV в наплавленном шве, сформированном на сплаве CMSX-4 при импульсном режиме ТИГ с применением присадочного сплава IN625 по глубине шва: 1 – после наплавки; 2 – после нанесения ТЗП и старения при 870 °С (20 ч); l – расстояние от поверхности наплавленного шва

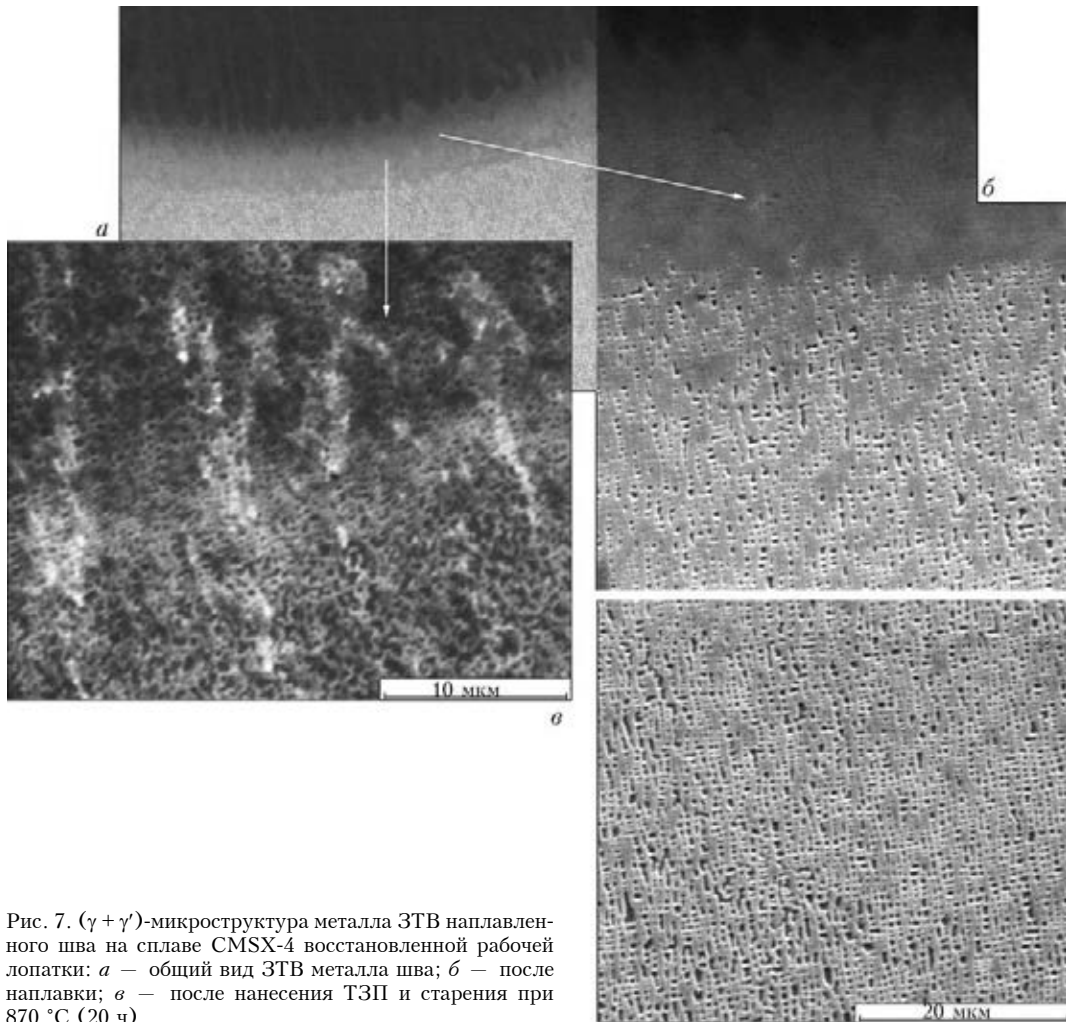


Рис. 7.  $(\gamma + \gamma')$ -микроструктура металла ЗТВ наплавленного шва на сплаве CMSX-4 восстановленной рабочей лопатки: *а* – общий вид ЗТВ металла шва; *б* – после наплавки; *в* – после нанесения ТЗП и старения при 870 °С (20 ч)

микротвердости металла шва, ЗТВ и уровня введенных при наплавке термических напряжений.

На рис. 7 показано выделение в процессе термообработки в металле ЗТВ регулярных частиц субдисперсной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, наличие которой на линии сплавления и в горячих участках ЗТВ обеспечивает необходимую жаропрочность металлу ремонтной зоны и материалу основы.

Незначительная развитость межфазных границ основа/NiCoCrAlY/IN625 без каких-либо дефектов или выделений хрупких фаз, или эвтектик свидетельствует об относительной термической стабильности системы (рис. 3). Отмечена высокая адгезионная прочность металлического подслоя с базовым монокристалльным сплавом и материалом ремонтной зоны – IN625 (рис. 3).

Достаточно большой размер зерен металла восстановленной наплавкой ТИГ ремонтной зоны способствует росту сопротивления ползучести торца лопатки при эксплуатации.

### Выводы

1. Разработаны подходы к комплексному ремонту рабочих лопаток из монокристалльного жаропрочного никелевого сплава CMSX-4, включающие восстановление торцевой кромки пера способом арго-

нодуговой наплавки и нанесение на восстановленное изделие ТЗП.

2. Управлением формой сварочной ванны при аргонодуговом процессе ТИГ можно создавать плоский фронт кристаллизации, что обеспечивает эпитаксиальный рост монокристалла в материале наплавленного шва. Для предотвращения образования на фронте кристаллизации ЗСО и межкристаллитных трещин необходимо вести процесс при минимальной скорости импульсной аргонодуговой наплавки и вкладываемой мощности процесса. Создание условий направленной кристаллизации позволяет сохранить преобладающее направление роста монокристалла в нижней части наплавки как минимум на высоту  $1/2 \dots 2/3$  полного шва.

3. Применение присадочного материала в виде сварочной проволоки IN625 позволило сформировать швы без горячих трещин в области ЗТВ и наплавленного металла с минимальным количеством ЗСО. Благодаря использованию проволоки IN625 с массовой долей  $(Al + Ti) \leq 0,8 \%$  получены швы, исключая горячие микротрещины, вызванные дисперсионным твердением. Малый диаметр проволоки определяет меньшие вкладываемую мощность процесса наплавки и глубину формирующейся сварочной ванны, а также плоский фронт кристаллизации. Наплавленный материал IN625 обе-



спечивает ремонтной зоне необходимую стойкость против окисления и коррозии, а также сопротивление против ползучести при рабочей температуре и т. д. При относительно невысокой твердости  $HRC$  25...30 наплавка из сплава IN625 достаточно технологична и легко обрабатывается. Присадочная проволока IN625 дает возможность разбавления высоколегированной сварочной ванны благодаря уменьшению количества  $\gamma'$ -образующих элементов и карбидных фаз (минимальное содержание углерода), что снижает гетерофазность металла наплавленного шва и повышает сопротивление против межкристаллитного разрушения.

4. Отработанная на замковых частях монокристалльных деталей технология аргонодуговой наплавки апробирована при восстановлении сегментов пера лопатки после эксплуатации в составе турбины. Оптимизированные подходы и режимы аргонодуговой импульсной наплавки реализованы в процессе ремонта торца пера лопатки 1-й ступени двигателя (сплав CMSX-4). Выбранные режимы наплавки ТИГ, малая вкладываемая мощность процесса и скорость сварки 2,4 м/ч при превалирующем росте монокристалла в направлении  $\langle 001 \rangle$ , а также и плоскости наплавки (110) обеспечили формирование плоского фронта кристаллизации с минимальным количеством ЗСО и отсутствием горя-

чих кристаллизационных трещин. Формирование качественной монокристаллической структуры достигнуто с применением многопроходной наплавки по торцам восстанавливаемой лопатки.

5. Теплозащитное покрытие, нанесенное на лопатку, позволяет сохранить характеристики и свойства монокристалльного сплава и металла ремонтной зоны, восстановленной ТИГ и, таким образом, продлить срок ее дальнейшей эксплуатации. Совместимость жаростойкого покрытия NiCoCrAlY, наплавки IN625 и монокристалльного сплава CMSX-4 способствует термической стабильности отреставрированной лопатки и обеспечивает ее функциональную надежность.

1. Barabash O.M., Horton J.A., Babu S.S. Multiscale characterization of deformation mechanisms in the weld joint of a nickel-based superalloy // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. — 2005. — Vol. 882E: — P. EE4.11.1–EE4.11.6.
2. Толорая В.Н., Орехов Н.Г., Чуварова Е.Н. Безуглеродистые Re-содержащие никелевые сплавы для турбинных лопаток // Литейн. пр-во. — 2012. — № 6. — 16 с.
3. DuPont J.N., Lippold J.C., Kiser S.D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys. — New Jersey, 2009. — P. 298–326.
4. Восстановление монокристалльных рабочих лопаток с применением аргонодуговой наплавки и нанесением теплозащитного покрытия. Часть I / А.Ф. Белявин, Д.А. Федотов, В.В. Куренкова, Д.П. Хомич // Современ. электрометаллургия. — 2013. — № 1. — С. 49–57.

Selection of filler material for restoration of edge end of blade airfoil of single-crystal alloy CMSX-4 by the method of argon arc surfacing was investigated. The material being deposited (alloy IN625) provides the required resistance against oxidation and corrosion for the edge end of blade airfoil and also creep resistance at operating temperature and allows formation of deposited metal without hot cracks at minimum amount of grains of random orientation. Approach was developed for the integrated repair of blades of alloy CMSX-4, including restoration of airfoil end by surfacing and deposition of heat-resistant sublayer and heat-protective coating on the product by the method of electron beam deposition, including all the necessary types of thermomechanical treatment for extension of service life of critical products of GTE. Ref. 4, Tables 2., Figs. 7.

**Key words:** single-crystal alloy; orientation; grains of random orientation; dispersion-strengthened alloys; heat-affected zone; dendritic growth; deposited metal; heat-resistant coating; diffusion zone; heat-protective coating

Поступила 12.03.2013