



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ И ПАЙКИ ПРИ РЕМОНТЕ ЛИТЫХ ЛОПАТОК ИЗ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

М. С. САМОХИН, инж., **Г. Ф. МЯЛЬНИЦА**, канд. техн. наук, **В. А. КРЕЩЕНКО**, инж.,
С. М. САМОХИН, канд. техн. наук (ГП НПКГ «Заря»-«Машпроект», г. Николаев),
Ю. Г. ДОБКИНА, инж. (Физико-технолог. ин-т металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев)

Рассмотрена структура литых лопаток в исходном и термообработанном состоянии. Аустенизация до сварки обеспечивает жаропрочность (900 °С) сварных соединений на уровне основного металла. Дана экспериментальная оценка структуры восстановленных наплавкой и пайкой ремонтных участков лопаток газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, дуговая пайка, никелевые сплавы, сварные соединения, присадочные материалы, эвтектическая фаза, термическая обработка, жаропрочность, микроструктура, ремонт лопаток

Наиболее ответственными деталями газотурбинных двигателей (ГТД) являются рабочие и сопловые лопатки из жаропрочных никелевых сплавов. При этом высокая стоимость конструкционных материалов, сложность и энергоёмкость производства лопаток обуславливают необходимость развития ремонтных технологий [1]. Актуален ремонт как литейного брака лопаток, так и лопаток, прошедших наработку определенного ресурса.

Анализ информации показывает, что в основе большинства современных технологий ремонта литых деталей соплового аппарата ГТД используется способ вакуумной диффузионной пайки порошковыми композиционными припоями, нередко в сочетании с переплавом металла ремонтной заделки электронным лучом или дугой с полым катодом [2–5]. Такой подход продиктован отчасти сложностью технологической реализации многих рекомендаций [6, 7] по предупреждению трещинооб-

разования в жаропрочных никелевых сплавах под воздействием электродугового нагрева, касающихся предварительного или сопутствующего подогрева или длительного многоступенчатого перестаривания.

Тем не менее, в условиях газотурбинного производства проще выполнять ремонт лопаток, используя доступные, технологически распространенные и хорошо освоенные способы, к которым относится аргонодуговая сварка с локальной или общей защитой детали [8–10]. В этом случае технологический процесс сварки характеризуется использованием простого стандартного оборудования, возможностью визуального контроля, пригодностью при производстве широкой номенклатуры узлов и деталей.

Эффективно снижают вероятность появления трещин и способствуют получению качественных соединений при сварке жаропрочных никелевых сплавов такие известные технологические приемы, как термическая обработка основного металла перед сваркой, использование специального состава присадочной проволоки и минимальной погонной энергии дуги [6, 7].

Таблица 1. Химический состав литейных никелевых сплавов

Марка сплава	Массовая доля основных элементов, %					
	Cr	W	Mo	Co	Ti	Al
ЭК9-ВИ	19,0...20,0	2,5...4,0	3,0...4,0	4,0...6,0	2,0...3,0	3,0...4,0
ЧС104У-ВИ	20,0...21,8	3,0...4,0	0,3...0,9	10,3...12,0	3,1...3,9	2,1...2,9
IN738LC	16,0	2,6	1,75	8,5	3,4	3,4

Продолжение табл. 1

Марка сплава	Массовая доля основных элементов, %					
	Nb	Ta	Zr	Hf	C	B
ЭК9-ВИ	1,4...2,0	–	–	–	0,10...0,15	0,12
ЧС104У-ВИ	0,15...0,35	–	0,03...0,05	–	0,07...0,14	0,015
IN738LC	2,0	1,2	0,1	–	0,17	0,17

Примечание. Здесь и в табл. 2 во всех сплавах никель – основа.

Применительно к аргодуговой сварке сложнолегированных высокохромистых жаропрочных сплавов, марочный состав которых приведен в табл. 1, данные технологические приемы изучены недостаточно, а практические рекомендации в технической литературе не приводятся. С целью расширения номенклатуры изделий, ремонтируемых аргодуговой сваркой, и отработки ремонтной технологии в настоящей работе исследовано влияние состава присадочных материалов и режимов термообработки основного материала до и после ручной аргодуговой сварки на токах 80...100 А на жаропрочность стыковых сварных соединений литых пластин толщиной 4...5 мм из сплавов ЭК9-ВИ и ЧС104У-ВИ.

Для назначения режимов термообработки сварных соединений важное значение имеет системное изучение закономерностей структурно-фазовых изменений строения сплавов ремонтируемых деталей.

Анализ данных, накопленных ГП НПКГ «Заря»-«Машпроект» по структурно-фазовому строению металла литых лопаток после наработки ресурса, показывает, что наиболее интенсивное разрушение рабочей поверхности и негативные изменения структуры металла происходят в пере лопатки. После эксплуатации при температуре 850...950 °С для лопаток различных ступеней ГТД, изготовленных из высокохромистых литейных сплавов ЭК9-ВИ, ЧС104У-ВИ и ЧС88У-ВИ, наиболее характерно наличие следующих основных типов дефектов:

областей коррозионного повреждения рабочей поверхности и выработки основного металла в наиболее горячих участках разрушения защитного покрытия;

структурных изменений основного металла, выраженных в формировании на границах зерен карбидами $Me_{23}C_6$, Me_6C и эвтектической γ -фазой сплошных пленок, а в матрице — «сетки» из выделений пластинчатой σ -фазы (рис. 1, а) при увеличении общего количества и ориентированной коагуляции γ -фазы.

При сварке жаропрочных никелевых сплавов возможно зарождение горячих микротрещин на межкристаллитных границах околошовной зоны (ОШЗ) в участках оплавления метастабильных фаз, скопления интерметаллидных соединений неблагоприятной морфологии и микропор [7].

Деградация рабочей поверхности и внутренней структуры металла лопаток при эксплуатации существенно ухудшает их ремонтпригодность при дуговой сварке, поскольку карбидная окантовка границ зерен и пластинчатые выделения σ -фазы способствуют развитию трещин. Негативно сказывается на трещиностойкости при аргодуговом ремонте поверхностных дефектов лопаток и наличие в металле после литья большого количества ликвиационных колоний на основе комплексной эвтектики ($\gamma + \gamma' + MeC + Me_3B_2$) по границам зерен и включений карбидов неблагоприятной формы (рис. 1, б). Очевидно, что для уменьшения концентрации грубых структурных составляющих на границах зерен после литья или наработки экс-

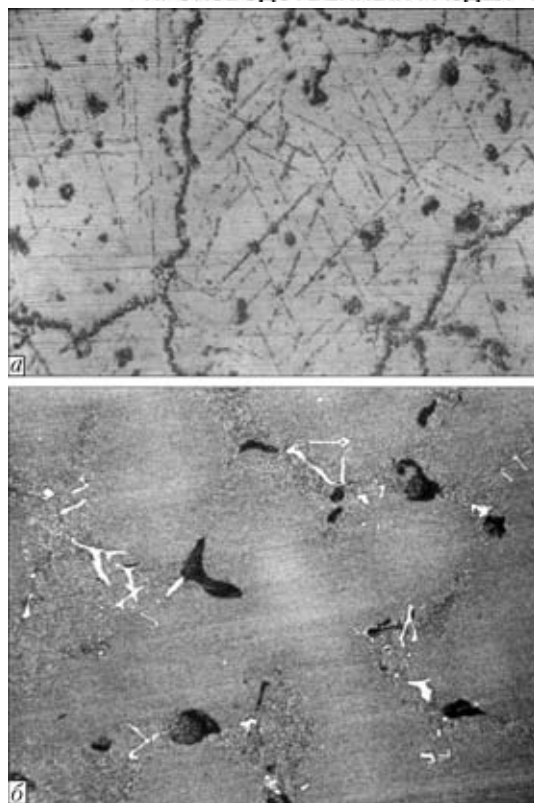


Рис. 1. Микроструктура металла пера рабочей лопатки, выполненной из сплава ЧС88У-ВИ после наработки 21690 ч, $\times 400$ (а); ЧС88НК после литья (б), $\times 200$

плуатационного ресурса, а также с целью повышения трещиностойкости металла лопаток перед сваркой необходимо производить его термическую обработку.

В настоящее время нет единого мнения относительно эффективности влияния на свариваемость гомогенизации или перестаривания жаропрочного сплава перед сваркой. Использование той или иной термообработки зависит от того, уменьшается ли вследствие ее применения количество фаз, обеспечивающих релаксационную стойкость сплава или приводящих к появлению трещин и оплавлению границ зерен при сварке.

Экспериментально установлено, что высокотемпературная аустенизация (гомогенизация) сложнолегированных высокохромистых жаропрочных сплавов ЭК9-ВИ и ЧС104У-ВИ перед ручной аргодуговой сваркой в сочетании с полным стандартным или частичным ступенчатым старением после сварки, по сравнению с другими исследованными стандартными видами досварочной термообработки, обеспечивает более высокие показатели кратковременной и длительной прочности соединений при температуре 900 °С (рис. 2). В этом случае разрушение сварных образцов при испытаниях практически всегда происходило по шву, что косвенно свидетельствует об отсутствии в металле ОШЗ трещин как после сварки, так и при последующей термообработке.

При других видах термообработки металла перед сваркой жаропрочность соединений ниже, а разрушение сварных образцов происходит преимущественно по ОШЗ. Это обусловлено существ-

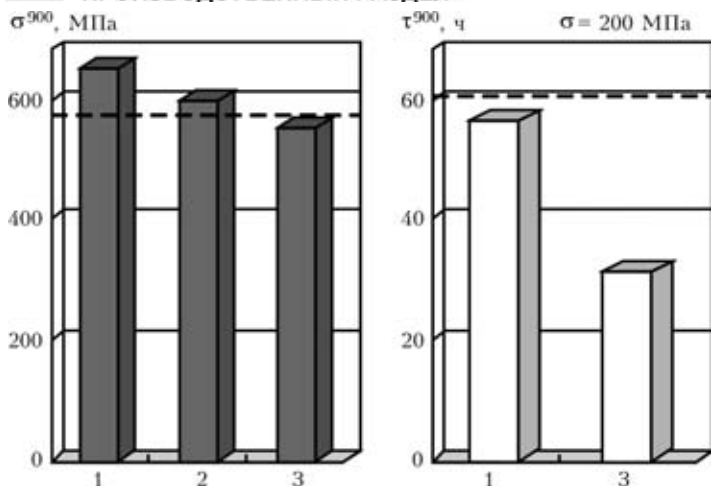


Рис. 2. Жаропрочность сварных соединений сплава ЧС104У-ВИ: 1 — аустенизация–сварка–закалка+старение; 2 — аустенизация–закалка+старение–сварка; 3 — аустенизация–закалка+старение–сварка–закалка+старение; штриховая прямая — параметры для основного металла

венным понижением деформационной способности металла ОШЗ под действием сварочного нагрева в связи с довыделением тонкодисперсной γ -фазы, огрублением морфологии включений первичной γ -фазы и карбидов, а также возможным выделением топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз по границам и внутри зерен.

Аналогично влияние исследованных видов термообработки на свойства сварных соединений сплавов ЧС88У-ВИ, IN738LC, ЧС70-ВИ и GT2100. При ремонтной сварке дефектов отливок жаропрочных никелевых сплавов обычно используют стандартные сварочные проволоки ЭИ868, ЭП367, ЭП595, ЭП648-ВИ, ЭП533 и др., легированные хромом, молибденом и вольфрамом (табл. 2).

Практическая апробация проволок с высокой концентрацией молибдена типа ЭП595 при аргонодуговой сварке лопаток на малых значениях погонной энергии показала, что большая вязкость расплавленного присадочного металла и плохие смачиваемость поверхности и проплавление кромок основного материала металлом сварочной ванны способствуют появлению рыхлот, пор и несплавлений между слоями шва. Более высокое качество при сварке и наплавке обеспечивается в случае применения высокохромистых проволок ЭП533, ЭП648 и ЭП868.

Оценить ожидаемые прочностные свойства наплавленного металла при аргонодуговой заварке дефектов лопаток стандартными сварочными проволоками сложно, поскольку известны только ме-

ханические свойства проволок в деформированном состоянии. Данные о прочностных свойствах металла таких проволок после дугового переплава и старения отсутствуют.

Определены механические свойства металла, наплавленного этими проволоками. Сравнительные прочностные испытания металла проволок были проведены на образцах из слитков, прошедших старение ($T = 850\text{ }^\circ\text{C}$, 16 ч, охлаждение на воздухе) после аргонодугового переплава на водоохлаждаемом медном поддоне. Результаты испытаний, представленные на рис. 3, показывают что при 20 и 800 $^\circ\text{C}$ наиболее высокая прочность у металла, наплавленного проволокой ЭП533. При этом обнаружена тенденция понижения пластичности наплавленного металла с повышением концентрации хрома в проволоках, что свойственно никелевым сплавам с хромом [11].

Высокая концентрация хрома в проволоках ЭП533, ЭП868 и ЭП648 гарантирует уровень стойкости наплавленного металла против окисления и высокотемпературной коррозии при температуре 800...1000 $^\circ\text{C}$ не хуже, чем у сплавов ЭК9-ВИ, ЧС104У-ВИ. Тем не менее, максимальная концентрация γ -фазы в наплавленном металле обычно не превышает половины ее количества в основном металле. При этом, учитывая завышенную суммарную концентрацию хрома, молибдена и вольфрама, металл шва по сравнению с основным металлом будет отличаться более низким темпом выделения γ -фазы и высокой склонностью к выделению ТПУ фаз. Эти факторы затрудняют возможность получения ремонтных участков, равноценных основному металлу по эксплуатационным характеристикам. Кроме того, поскольку выделение и растворение γ -фазы в никелевых сплавах сопровождается объемными изменениями металла [12], работа лопатки в условиях термоциклирования будет сопровождаться появлением трещин в ремонтном участке [10, 13] после определенной наработки ресурса.

Для предотвращения появления трещин при сварке специалисты рекомендуют в сплавах различных систем легирования повышать концентрации бора, ниобия, циркония или гафния для совершенствования морфологии карбоборидных фаз по границам зерен или формирования в металле шва двухфазной структуры со сложнолегированной эвтектической фазой [6, 14–18]. К тех-

Таблица 2. Химический состав присадочных материалов

Марка стали	Массовая доля основных элементов, %							
	Cr	W	Mo	Ti	Al	Nb	C	B
Св-ХН75МБЮТ (ЭИ602)	19,0...22,0	—	1,8...2,3	0,35...0,75	0,35...0,75	0,9...1,3	0,10	—
Св-ХН60ВГ (ЭИ868)	23,5...26,5	13,0...16,0	—	0,30...0,70	≤ 0,50	—	0,01	—
Св-06Х15Н60М15 (ЭП367)	14,0...16,0	—	14,0...16,0	—	—	—	0,08	—
Св-Х11Н60М23 (ЭП595)	9,0...13,0	—	21,5...24,5	—	—	—	≤ 0,10	—
Св-Х50ВМТЮБ (ЭП648)	32,0...35,0	4,3...5,3	2,3...3,3	0,50...1,50	0,50...1,10	0,5...1,1	≤ 0,06	≤ 0,008
Св-08Х20Н57М8В8ТЗР (ЭП533)	19,0...22,0	7,0...9,0	7,0...9,0	2,30...2,90	≤ 0,40	—	≤ 0,10	≤ 0,005

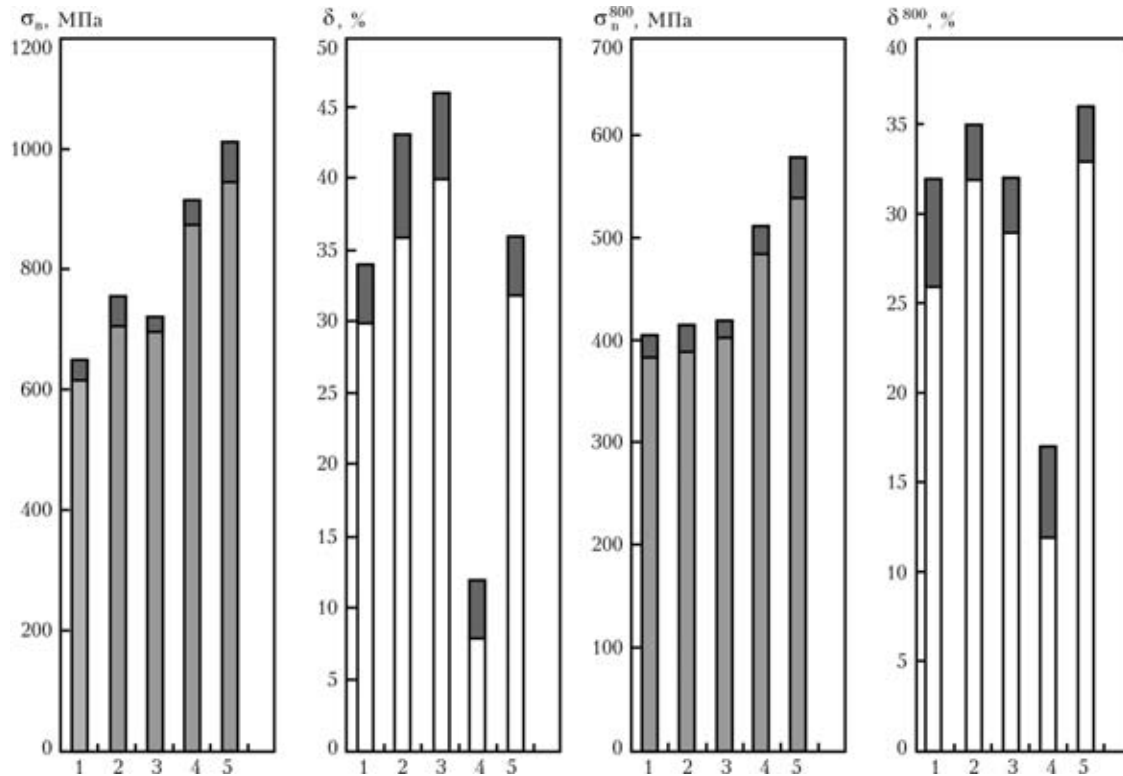


Рис. 3. Механические свойства металла хромоникелевых сварочных проволок после аргодугового переплава их и старения ($T = 800^\circ\text{C}$, 16 ч): 1 – ЭИ602; 2 – ЭИ868; 3 – ЭП367; 4 – ЭП648; 5 – ЭП533

нологически освоенным относятся как присадочные проволоки, так и конструкционные свариваемые жаропрочные сплавы никеля с бором и ниобием [14–18]. Концентрации этих элементов, обеспечивающие формирование в наплавленном металле эвтектической фазы в количестве, достаточном для предотвращения образования трещин при сварке, составляют 0,35...0,65 % В и 4,0...7,0 % Nb [14, 18]. Но введение более 0,1 % В или свыше 2,0 % Nb отрицательно сказывается на высокотемпературной коррозионной стойкости хромоникелевых сплавов [19–23]. Кроме того, присутствие указанных элементов в сплаве выше предела растворимости приводит к выделению самостоятельных грубодисперсных интерметаллидных фаз, дестабилизирует фазовое равновесие жаропрочных сплавов, ухудшает их жаропрочность и металлургическую совместимость с защитными покрытиями [23, 24].

Идея использовать эвтектики с цирконием для улучшения свариваемости и предотвращения образования горячих трещин при дуговой сварке хромоникелевых сталей и сплавов впервые отмечена в работе [14]. Применительно к сложнолегированным высокохромистым никелевым сплавам типа ЭК9-ВИ, ЧС104У-ВИ изучено микролегирование цирконием и гафнием, однако к настоящему времени систематически не исследовано влияние легирования более ощутимыми концентрациями циркония или гафния на фазовое строение, свойства и свариваемость указанных сплавов.

Практика совместных работ с Украинским государственным морским техническим университетом имени адмирала Макарова (Николаев), ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ и Института металлофизики (ИМФ) им. Г. В. Курдюмова НАНУ

показала возможность и эффективность использования известных цирконийсодержащих сложнолегированных никелевых припоев [25, 26] при аргодуговом ремонте дефектов литых лопаток. Но при этом не всегда удается обеспечить устойчивость наплавленного металла против образования рыхлот и трещин.

После коррекции технологических режимов наплавки и состава цирконийсодержащего присадочного материала с учетом требований ремонтных технологий, использующих дуговой нагрев, совместно с ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ и ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАНУ, разработаны и исследованы новые опытные композиции присадочных материалов с повышенными концентрациями циркония, хрома и других элементов, образующих с никелем эвтектику [27–29]. Это позволило формировать при расплавлении необходимое количество комплексно-легированной эвтектической фазы, характеризующейся значительной способностью к межзеренной миграции и металлургической совместимостью с основным металлом. Сочетание легирующих элементов и их концентрации в новых присадочных материалах выбирали с учетом известных рекомендаций по обеспечению стойкости никелевых сплавов транспортных ГТУ против высокотемпературной солевой коррозии, совместимости с защитными покрытиями и жаропрочности [20, 30], а также обеспечения минимального интервала кристаллизации металла наплавки.

Ремонт поверхностных и сквозных дефектов аргодуговой сваркой с «эвтектическими присадками» выполнен на опытных отливках и серийных лопатках из сплавов ЭК9-ВИ, ЧС104У-ВИ.

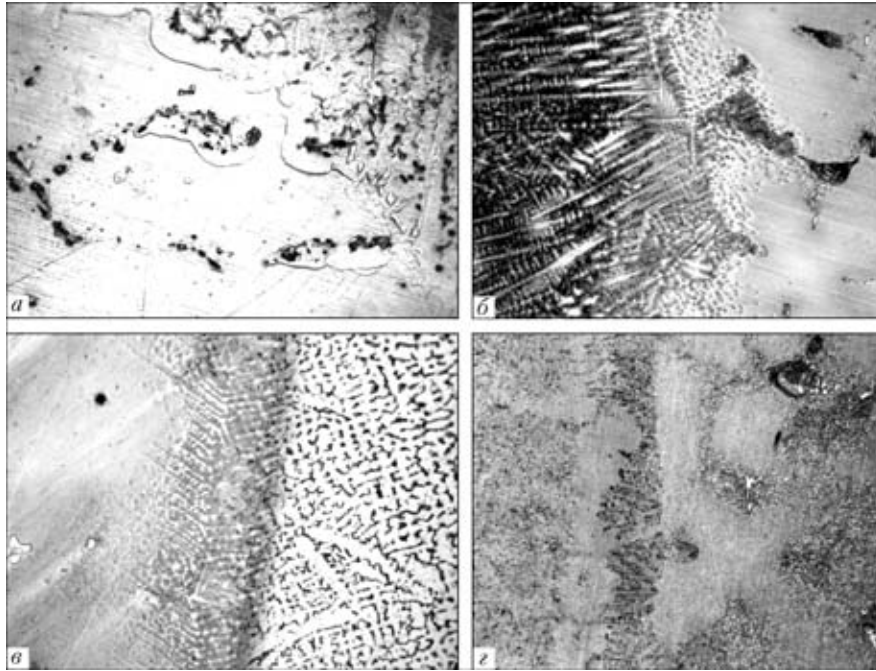


Рис. 4. Микроструктура зоны сплавления участков ремонтной сварки лопаток из сплавов ЧС104У-ВИ (а) и ЧС88НК (б-г): а — проволока Св-08Х20Н57М8В8ТЗР (ЭП533), $\times 400$; б-г — опытные присадочные материалы на основе системы Ni-Cr-Zr, $\times 200$, после дуговой сварки (пайки) (б, в) и при стандартной термообработке после сварки (г)

В отличие от гомогенных сварочных проволок, при сварке которыми формируются ровная граница сплавления с локальным подплавлением границ зерен основного металла (рис. 4, а), при наплавке присадками с цирконийсодержащей эвтектической фазой формируется граница раздела со множественными «проходами» по границам зерен ОШЗ (рис. 4, б, в), заполненными жидким металлом. Под воздействием жидкой фазы «облагораживаются» границы зерен основного металла, обнаружено дробление и растворение эвтектикой крупных включений карбидов, колоний эвтектической γ -фазы и других интерметаллидов на глубину 10...40 мкм. Эти факторы способствуют повышению однородности, высокотемпературной пластичности и устойчивости металла ОШЗ жаропрочных сплавов против образования трещин при сварке.

Опытные комплексно-легированные высокохромистые присадочные материалы на основе базовой системы Ni-Cr-Zr при аргодуговой пайке обеспечивают качественное формирование ремонтных участков лопаток независимо от вида досварочной термообработки, в том числе и при наплавке без подогрева.

Экспериментально установлено, что, несмотря на присутствие в межкристаллитных участках наплавленного металла эвтектической фазы с температурой плавления 1090...1155 °С, гомогенизация изделий после наплавки эффективно повышает однородность металла ремонтной заделки (рис. 4, г).

По данным микрорентгеноспектрального анализа, в эвтектических колониях по границам зерен наплавленного металла с концентрацией 9,0...15 % Zr выявлена комплексно-легированная интерметаллидная фаза, близкая по составу к соединению типа $Ni_7(Zr, Ti)_2$. После термообработки указанная фаза не зафиксирована. Отмечается также уменьшение в наплавленном металле общего количества

карбидов $Cr_{23}C_6$ и увеличение количества карбидов MeC, в которых концентрация циркония достигает 40...80 %. При этом цирконий способствует существенному измельчению дендритной структуры и модифицированию карбидной фазы в наплавленном металле. Фазовый состав последнего и его стойкость против высокотемпературной коррозии приближены к основному металлу.

Аналогичный характер взаимодействия и формирования структуры обнаружен при дуговой пайке опытными присадками с цирконием на сплавах ЧС88У-ВИ, ЧС70-ВИ, IN738LC, GT2100.

В настоящее время новые присадочные материалы с цирконийсодержащей эвтектической фазой прошли технологическую проверку при ремонте литых лопаток различных ступеней. Уточняются составы, обеспечивающие жаропрочность и коррозионную стойкость наплавленного металла на лопатках с направленной кристаллизационной структурой. Результаты проведенных исследований и испытаний позволили разработать технологические рекомендации и обосновать режимы ремонта литых лопаток ГТД, увеличить объемы ремонта бракованных литых лопаток и лопаток после наработки ресурса в составе ГТУ.

Выводы

1. Установлено, что после наработки ресурса при температуре 850...950 °С в составе ГТД, а также в состоянии после литья для высокохромистых сложнелегированных жаропрочных никелевых сплавов характерно наличие на межкристаллитных границах сплошных пленок и грубодисперсных выделений на основе карбидов хрома, эвтектики $\gamma + \gamma'$ и ТПУ фаз, что способствует появлению трещин и затрудняет ремонт эксплуатационных и ли-

тейных дефектов лопаток способом аргодуговой сварки.

2. Технологическое апробирование стандартных присадочных проволок, легированных молибденом, вольфрамом и хромом, при аргодуговой ремонтной наплавке литых лопаток из сплавов ЭК9, ЧС70-ВИ, ЧС88У-ВИ, ЧС104У-ВИ показало, что минимальное количество дефектов и стойкость наплавленного металла при высокотемпературной коррозии обеспечивается с применением проволок ЭП533, ЭП868 и ЭП 648.

3. Применение аустенизации (гомогенизации) основного металла перед сваркой по сравнению с другими видами термообработки обеспечивает высокую, сравнимую с основным металлом, жаропрочность сварных соединений при 900 °С, в том числе при использовании стандартных высокохромистых сварочных проволок.

4. Разработаны и прошли технологическую проверку при ремонте литых лопаток различных ступеней ГТД новые комплексно-легированные присадочные материалы с цирконийсодержащей эвтектической фазой, благодаря которой обеспечивается растворение в металле ОШЗ неблагоприятных структурных составляющих по границам зерен и качественное формирование ремонтных участков лопаток независимо от вида досварочной термообработки.

1. Мьяльница Г. Ф. Особенности техпроцесса изготовления лопаток турбин из высокохромистых жаропрочных сплавов на никелевой основе // Изв. Акад. инж. наук Украины. — 1999. — № 1. — С. 266–269.
2. Технология восстановления сопловых лопаток авиационных двигателей методом пайки и электронно-лучевого переплава / А. Н. Аржакин, И. И. Столяров, В. М. Язовских и др. // Свароч. пр-во. — 1998. — № 3. — С. 27–29.
3. Рывльшиков В. С., Шатов А. П., Царев В. И. Технология ремонта сопловых лопаток ГТД // Сварные конструкции: Тез. стейнд. докл. междунар. конф. (Киев, окт. 2000). — Киев, 2000. — С. 144–145.
4. Неровный В. М., Ямольский В. М., Рогов Р. М. Ремонт лопаток газовых турбин дуговой пайкой в вакууме // Энергомашиностроение. — 1989. — № 2. — С. 22–24.
5. Технология пайки дефектов литых из жаропрочных сплавов / В. В. Квасницкий, А. М. Костин, В. Ф. Квасницкий и др. // Соврем. пробл. свароч. науки и техники «Сварка-95»: Материалы Рос. науч.-техн. конф. (Пермь, окт. 1995). — Пермь, ПГТУ, 1995. — Ч. 1. — С. 245–247.
6. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. — М.: Машиностроение, 1966. — 432 с.
7. Землин В. Н. Жаропрочность сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1972. — 272 с.
8. Заварка литых и эксплуатационных дефектов на лопатках газовых турбин из жаропрочных никелевых сплавов / Н. И. Пинчук, В. Ф. Хорунов, Л. С. Захаров и др. // Сварка и родственные технологии в XXI век: Тез. докл. междунар. конф. (Киев, сент. 1998). — Киев, 1998. — С. 93.
9. Сорокин Л. И., Лукин В. И., Багдасаров Ю. С. Свариваемость литых жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС 6 // Свароч. пр-во. — 1997. — № 6. — С. 12–17.
10. Сорокин Л. И., Федоров Б. М. Заварка знаковых отверстий при ремонте турбинных лопаток из сплава ЖС 26 ВСНК // Там же. — 2002. — № 8. — С. 34–37.

11. Булат С. И., Тихонов А. С., Дубровин А. К. Деформируемость структурно неоднородных сталей и сплавов. — М.: Металлургия, 1975. — 352 с.
12. Изучение кинетики упрочнения и разупрочнения жаропрочных сплавов с целью выбора температурного интервала горячей пластической деформации и термической обработки / Н. П. Жетвин, Я. Л. Фрид, Е. М. Концевая и др. // Свойства и применение жаропрочных сплавов: Сб. науч. тр. — М.: Наука, 1966. — С. 213–218.
13. Особенности сварки высоконикелевых дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов и ремонта изготавливаемых из них изделий / В. С. Савченко, К. А. Ющенко, Н. И. Саволей, А. В. Шавель // Автомат. сварка. — 1993. — № 10. — С. 31–33.
14. Медовар Б. И., Пинчук Н. И., Чекотило Л. В. Аустенитно-боридные стали и сплавы для сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1970. — 198 с.
15. Зимица Л. Н. Свариваемые жаропрочные никелевые сплавы и принципы их легирования // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1977. — № 11. — С. 2–7.
16. Макушек О. В., Тащилов В. С., Мельников Н. А. Улучшение свариваемости жаропрочных сплавов типа ХН67МВТЮ за счет легирования Nb, Hf, Ta, Re // Влияние легирования и термической обработки на свойства качественных сталей и сплавов: Сб. науч. ст. — М.: Металлургия, 1985. — С. 34–36.
17. Сорокин Л. И., Ерохин А. А., Кузнецов О. М. Влияние рения, ниобия и тантала на механические свойства наплавленного металла // Автомат. сварка. — 1971. — № 12. — С. 61–62.
18. А. с. 1425012 СССР, МКИ¹ В 23 К 35/30. Состав сварочной проволоки / К. А. Ющенко, Н. И. Пинчук, А. Г. Данилик и др. — Опубл. 23.09.88, Бюл. № 35.
19. Киреев В. Б. Стали и сплавы для высокотемпературной службы // Жаропрочные и жаростойкие металлические материалы. — М.: Наука, 1987. — С. 40–55.
20. Гайдук С. В., Беликов С. Б., Коваль А. Д. Принципы создания высококоррозионно-стойких сплавов // Новые конструкционные материалы и эффективные методы их получения и обработки: Сб. науч. тр. — Киев: УМК ВО, 1988. — С. 4–6.
21. А. с. 959443 СССР, МКИ⁵ С 22 С 19/05. Жаропрочный коррозионный сплав на основе никеля / О. С. Костырко, Г. Ф. Мьяльница, Н. И. Волощенко и др. — Опубл. 30.10.90, Бюл. № 40.
22. А. с. 677531 СССР, МКИ⁵ С 22 С 19/05. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля / Е. П. Перемужов, В. М. Степанов, Е. Г. Кононова и др. — Опубл. 15.11.90, Бюл. № 42.
23. Елисеев Ю. С., Абрамов Н. В., Крымов В. В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. — М.: Высш. шк., 1999. — 525 с.
24. Хилмушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1969. — 749 с.
25. А. с. 1544541 СССР, МКИ⁵ В 23 К 35/32. Припой для пайки жаропрочных сплавов / В. Ф. Квасницкий, В. А. Игнатов, В. М. Заболотский и др. — Опубл. 23.02.90, Бюл. № 7.
26. А. с. 1743773 СССР, МКИ⁵ В 23 К 35/32. Припой для пайки жаропрочных никелевых сплавов / В. Ф. Хорунов, Е. М. Укадер, В. П. Зубченко. — Опубл. 30.06.92, Бюл. № 24.
27. Пат. 43903 Украина, МКИ⁷ В 23 К 35/32. Припой для паяния / С. М. Самохин, В. Ф. Квасницкий, В. Ф. Хорунов та ін. — Надр. 15.01.02, Бюл. № 1.
28. Brazing filler metals containing Zr and Hf as depressants / V. F. Khorunov, S. V. Maksymova, M. S. Samokhin, V. G. Ivanchenko // High temperature capillarity: Third Intern. conf. of abstr. (Kurashiki, Japan, 19–22 Nov., 2000). — Kurashiki, 2000. — P. 60–61.
29. Arc brazing of heat-resistant nickel alloys / V. F. Khorunov, S. V. Maksymova, I. V. Zvolinsky, M. S. Samokhin // Intern. brazing and soldering conf. proc. (April 2–5, 2000). — Albuquerque, New Mexico, 2000. — P. 6–9.
30. Никитин В. И. Перспективы защиты никелевых сплавов от сульфидно-оксидной коррозии // Жаропрочные и жаростойкие металлические материалы. — М.: Наука, 1987. — С. 119–131.

Structure of cast blades in the as-welded and heat-treated conditions has been studied. Austenising of joints prior to welding provides their heat resistance (900 °C) at a level of base metal. Experimental evaluation of structure of the regions in gas turbine engine blades repaired by welding and brazing has been conducted.

Поступила в редакцию 04.07.2003