



СТРУКТУРА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДУГОВОГО НАГРЕВА

В. Ф. ХОРУНОВ, д-р техн. наук, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук, **И. В. ЗВОЛИНСКИЙ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы структура, химическая неоднородность и микротвердость структурных составляющих соединений, полученных с применением дугового нагрева и адгезионно-активных припоев системы Ni-Cr-Zr. Установлено, что при использовании припоев оптимальных составов и соответствующих технологических приемов удастся получить наплавленный металл низкой твердости и избежать появления трещин в паяных швах и околошовной зоне. Доказано, что при ремонте лопаток из несвариваемых суперсплавов с высоким (более 60 %) содержанием γ -фазы наиболее перспективно применение композиционных припоев.

Ключевые слова: высоколегированные никелевые сплавы, суперсплавы, γ -фаза, дуговой нагрев, паяное соединение, наплавленный металл, припой, композиционный припой, микроструктура, трещины

Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе используются для изготовления лопаток газотурбинных двигателей, применяемых в авиационной технике, судостроении и энергетическом машиностроении. Лопатки чаще всего изготавливают способом литья по выплавляемым моделям, при этом, как правило, образуются различного рода дефекты. Разработка технологии ремонта лопаток с целью удаления этих дефектов является одной из самых актуальных задач современного газотурбостроения.

Применение сварки возможно для ремонта лопаток из сплавов со сравнительно небольшим содержанием γ -фазы, что в основном зависит от массовой доли алюминия и титана [1]. Считается, что сплавы с высокой суммарной долей этих элементов (ЖС6У-ВИ, ЖС6К, ЖС26, ЧС 70, ЧС 88, ЧС 104ВИ, IN-738LC, 713С и др.) и значительным содержанием γ -фазы (суперсплавы) не подлежат сварке, если при этом не использовать специальные приемы. Так, в работе [2] для получения швов без трещин при сварке сплавов с высоким содержанием γ -фазы рекомендуется применять подогрев до 600 °С (при аргонодуговой сварке) и до 900 °С (при электронно-лучевой сварке). По мнению авторов, в этом случае важно контролировать цикл охлаждения в процессе сварки. Отмечается также, что даже небольшие отклонения в химическом составе сплава могут существенно повлиять на поведение суперсплавов при сварке.

Авторы работы [1] утверждают, что при электронно-лучевой сварке сплава IN-738LC возможно получение швов без трещин при сварке с подогревом до 1120 °С как при использовании присадочного металла, так и без него. Паяные соединения имеют высокую кратковременную прочность при 850 °С ($\sigma_B = 615...656$ МПа, $\sigma_{0,2} = 506...544$ МПа) и сопротивление многоцикло-

вой усталости, близкое к основному металлу. Распределение γ -фазы после полной термообработки носит гомогенный характер, размер частиц составляет 0,4 мкм.

Авторы работы [3] утверждают, что склонность к образованию трещин сплава 713С уменьшается с увеличением вложенной энергии и уменьшением скорости сварки. Очевидно, что данные этой работы аналогичны, содержащиеся в работах [1, 2], т. е. сводятся к уменьшению скорости охлаждения при сварке и снижению сварочных напряжений. При всей важности этих данных отметим, что изложенные в них результаты получены в идеальных условиях, которые далеко не соответствуют реальным, когда при ремонте к каждому типу дефектов необходим свой подход.

Экспериментальная часть. Авторами настоящей работы предлагается иной подход к решению проблемы устранения трещин при дуговом нагреве, заключающийся в снижении погонной энергии (не достигается критическая температура плавления основного металла), а также обеспечение возможности «залечивания» трещин, образующихся на границе соединения. Иными словами, предлагается использовать дуговой нагрев неплавящимся электродом в аргоне и припой — в качестве присадочного металла.

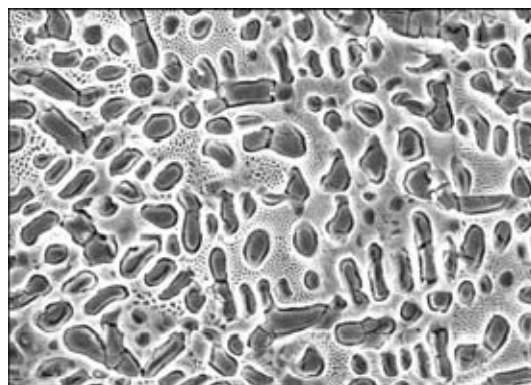


Рис.1. Микроструктура (X1800) наплавленного металла, полученного при дуговом нагреве с расплавлением основного металла с использованием присадки припоя системы Ni-Cr-Zr

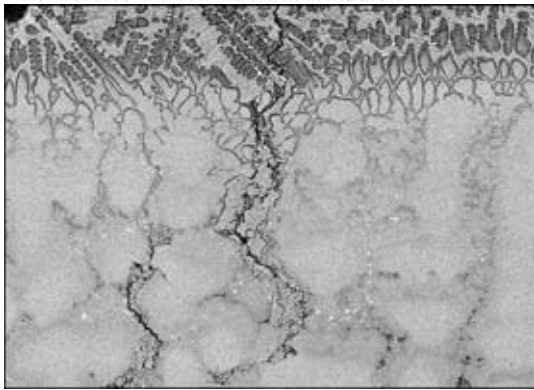


Рис. 2. Горячие трещины (X350), образовавшиеся при дуговом нагреве с расплавлением основного металла

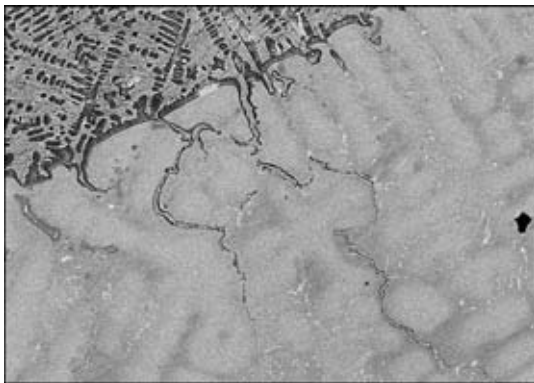


Рис. 3. «Залеченные» трещины на границе сплавления (X300), образовавшиеся при дуговом нагреве без расплавления основного металла с использованием припоя системы Ni-Cr-Zr

Выбор припоя основывался на нашем опыте применения в качестве депрессантов элементов IV и V групп таблицы Менделеева [4–6]. Припой системы Ni-Cr-Zr использовали в литом состоянии и композиционной форме (смесь порошков припоя и жаропрочного сплава). Для проведения исследований в качестве основного металла был выбран сплав с высоким (более 60 об. %) содержанием γ -фазы — ЖС6У-ВИ.

Методика проведения экспериментов была следующей. Для оценки температуры сварочной ванны со стороны «дна» искусственно созданного конусообразного дефекта прикреплялась термопара. Дуговой нагрев производился двумя способами: с расплавлением основного металла и без его расплавления.

Образцы для микрошлифов вырезали перпендикулярно плоскости подложки. Исследование химической неоднородности полученных наплавов проводили на растровом электронном микроскопе

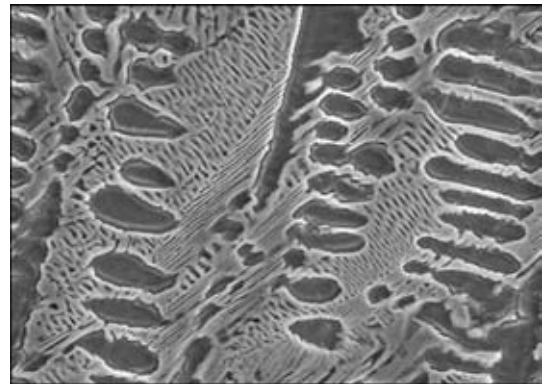


Рис. 4. Микроструктура (X1800) наплавленного металла, полученного при дуговом нагреве без расплавления основного металла с использованием припоя системы Ni-Cr-Zr

ISM-840 японской фирмы «Джеол», снабженном системой микроанализа. Исследования выполняли в режиме вторичных электронов.

Результаты металлографических исследований образцов, полученных при дуговом нагреве с расплавлением основного металла и последующей присадкой припоя системы Ni-Cr-Zr (в литом виде), показали, что микроструктура наплавленного металла состоит из первичных дендритов твердого раствора на основе никеля и эвтектической составляющей (рис. 1).

При изучении химической неоднородности выявлено, что наплавленный металл обогащен элементами основного металла (таблица). Таким образом, при расплавлении основного металла и припоя металл шва по химическому составу приближался к паяемому материалу. В зоне сплавления наблюдалось образование единичных горячих трещин. Они распространялись по границам зерен паяемого материала и в некоторых местах были частично заполнены припоем (рис. 2).

Существенное снижение теплового воздействия на основной металл достигалось в случае, если последний не расплавлялся, а смачивался расплавленным припоем. Склонность к образованию горячих трещин в этом случае уменьшалась, а главное, все они были заполнены припоем (рис. 3).

Очевидно, что трещины образовались при температуре выше температуры кристаллизации металла шва и более жидкотекучая составляющая припоя проникла по границам зерен паяемого металла. Полученная микроструктура наплавленного металла двухфазная, она состоит из крупных дендритов твердого раствора и эвтектической составляющей (рис. 4). Результаты исследований химической неоднородности наплавленного металла

Распределение элементов структурных составляющих наплавленного металла

| Структурные составляющие | Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|
| | Ni | Co | Zr | Ti | Cr | Mo | W | Nb | Al | Fe |
| Дуговой нагрев с расплавлением основного металла | | | | | | | | | | |
| Дендрит | 57,8 | 3,4 | 1,5 | 0,9 | 15,1 | 0,2 | 16,9 | 1,2 | 2,6 | 0,5 |
| Эвтектика | 69,3 | 1,7 | 19,3 | 1,0 | 3,5 | — | 1,9 | 1,4 | 1,9 | 1,0 |
| Дуговой нагрев без расплавления основного металла | | | | | | | | | | |
| Дендрит | 62,4 | 2,9 | 2,2 | 0,2 | 20,1 | 0,3 | 9,2 | 0,7 | 1,1 | 0,9 |
| Эвтектика | 69,8 | 1,5 | 19,9 | 0,4 | 4,8 | — | 0,6 | 1,6 | 1,4 | — |

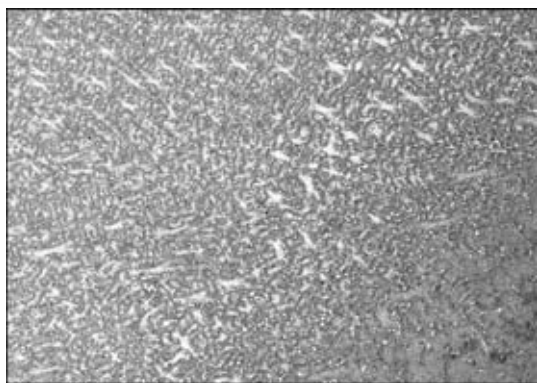


Рис. 5. Микроструктура (X200) металла границы сплавления образца из жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ, полученного с использованием композиционного припоя

показали, что в нем имеют место взаимные диффузионные процессы, происходящие между паяемым металлом и припоем, однако они выражены менее ярко (см. таблицу), чем при нагреве с расплавлением основного металла.

Дальнейшее уменьшение теплового воздействия на металл зоны сплавления достигается за счет применения порошковых композиционных припоев — смеси легкоплавкого сплава системы Ni-Cr-Zr и тугоплавкого высоколегированного жаропрочного сплава ЖС-26У. В этом случае особенно важно соотношение припоя и основного металла. С одной стороны, чем выше массовая доля тугоплавкой составляющей, тем выше уровень свойств наплавленного металла; с другой — массовая доля припоя не должна быть слишком низкой, поскольку следует обеспечить хорошее смачивание паяемого металла и возможность «залечивания» горячих трещин в случае их образования. При оптимальном соотношении припоя и наполнителя удастся избежать возникновения трещин и получить наплавленный металл с однородной мелкодисперсной структурой (рис. 5).

Обсуждение результатов. Как уже отмечалось выше, высоколегированные сплавы на основе никеля с высоким содержанием γ -фазы являются несвариваемыми. Если проанализировать суть происходящих процессов, то можно отметить, что, с одной стороны, при сварке происходит значительный перегрев ЗТВ. При этом наблюдается появление жидких прослоек по границам зерен и прочность металла резко падает. В этом случае достаточно воздействия незначительных сварочных напряжений, чтобы в паяемом металле появилась трещина. С другой стороны, при использовании присадочных материалов, близких по химическому составу к основному металлу, отсутствует возможность «залечивания» трещин, поскольку температура затвердевания металла жидкой ванны достаточно высока. Кроме того, трещины могут возникать в основном металле на некотором расстоянии от сварочной ванны. Увеличение вложенной энергии и снижение скорости сварки, как это предлагается в работах [1–3], действительно уменьшают сварочные напряжения, но увеличивают опасность воздействия такого фактора, как появление жидких прослоек на границах зерен.

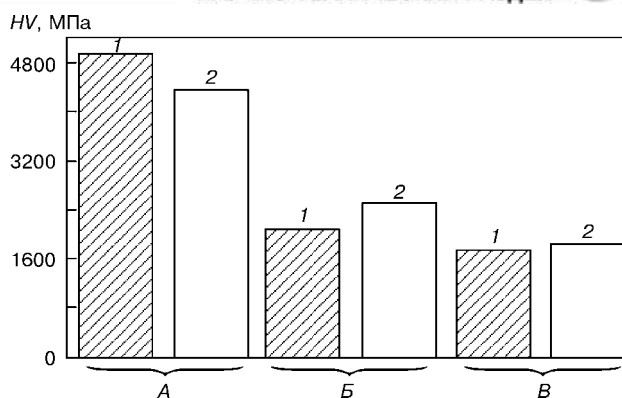


Рис. 6. Микротвердость структурных составляющих наплавленного металла, полученного при дуговом нагреве с расплавлением основного металла (1) и без его расплавления (2); А — основной металл; Б — дендрит; В — эвтектика

Предложенный авторами настоящей работы подход оказался весьма эффективным средством устранения горячих трещин. Он отличается тем, что при дуговом нагреве обеспечивает минимальное тепловложение. Тогда жидкие прослойки в околошовной зоне не образуются, а смачивание основного металла происходит при температурах значительно ниже температуры его плавления. Важную роль при этом играет как режим пайки, так и особенности припоев новых систем, например типа Ni-Cr-Zr, который имеет высокую адгезионную активность, более высокую пластичность, чем припой системы Ni-Cr-B-Si, низкую твердость. Последнее наглядно подтверждается результатами измерения микротвердости структурных составляющих наплавленного металла, выполненных различными способами (рис. 6).

Следует отметить, что наилучшие результаты получены при использовании не литых, а композиционных припоев, с помощью которых оказалось возможным регулировать не только состав наплавленного металла, но и тепловложение. Более того, в этом случае на химический состав наплавленного металла мало влияют размеры дефектов. Естественно, также играет роль соотношение легко- и тугоплавкой составляющей композиционного припоя.

Структура наплавленного металла, полученного с использованием композиционных припоев, состоит из равномерно распределенных дисперсных участков твердого раствора и эвтектики, что создает благоприятные условия для гомогенизирующего отжига как вследствие неравновесности структуры, так и сравнительно небольшой протяженности диффузионных потоков.

Выводы

1. Сочетание дугового нагрева и адгезионно-активных припоев, например системы Ni-Cr-Zr, в качестве присадочного металла весьма перспективно для создания технологии ремонта деталей горячего тракта газотурбинных двигателей.

2. Установлено, что использование композиционных припоев особенно эффективно для регулирования химического состава наплавленного металла и тепловложения.



3. Применение композиционного припоя и дугового нагрева позволило исключить образование трещин и получить наплавленный металл с однородной мелкодисперсной структурой.

1. *Jahnke B.* High-temperature electron beam welding of the nickel-base superalloy IN-738LC // *Welding J.* — 1982. — Nov. — P. 343–347.
2. *Haafkens M. H., Matthey J. H. G.* A new approach to the weldability of nickel-base as-cast and powder metallurgy superalloys // *Ibid.* — P. 25–30.
3. *Improving the weldability of Ni-base superalloys 713C* / A. Koren, M. Roman, I. Weisshaus, A. Kaufman // *Ibid.* — 1968. — Nov. — P. 348–351.

Structure, chemical heterogeneity and microhardness of structural components of joints produced using argon arc heating and adhesion-active brazing alloys of Ni-Cr-Zr system are investigated. It was established that at optimum compositions of brazing alloys and technological procedures it is possible to provide the low hardness of deposited metal and to prevent the crack initiation in brazed welds and HAZ. It is proved that it is most rational to use the composite alloys in repair of blades from non-weldable superalloys with high (more than 60 %) content of γ' - phase.

4. *Khorunov V. F., Ukader E. M.* Principles for development of eutectic filler metals for heat resistant nickel alloy brazing // *Proc. of the Intern. conf. «Joining Welding 2000»*, Haque, July 1–2, 1991. — Oxford: Pergaman press, 1991. — P. 357–369.
5. *Khorunov V. F., Ivanchenko V. G., Kvasnitskij V. V.* Investigation of Ni-Cr-Zr and Ni-Cr-Hf alloys // *Intern. conf. «Brazing, high temperature brazing and diffusion welding»*, Aachen, May, 1998. — Aachen, 1998. — P. 59–61.
6. *Brazing filler metal containing Zr and Hf as depressants* / V. Khorunov, S. Maksymova, S. Samokhin, V. Ivanchenko // *Proc. of the Third intern. conf. «High temperature capillarity»*, Kurashiki, 19–22 Nov., 2000. — Osaka, 2001. — P. 419–424.

Поступила в редакцию 24.09.2002

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Журнал «Автоматическая сварка» входит в перечень изданий, утвержденных и рекомендованных ВАК Украины, публикации в котором учитываются для соискателей ученых степеней.

В соответствии с постановлением ВАК Украины от 15. 01. 2003 г. № 7-05/01 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України» редакционные коллегии научных специализированных изданий, признаваемых ВАК, должны принимать к печати только те статьи, которые имеют следующие необходимые элементы:

✓ постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными или практическими заданиями

✓ анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые ссылается автор

✓ выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящена данная статья

✓ формулировка целей статьи (постановка задачи)

✓ изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов

✓ выводы из представленного исследования и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

Специализированным ученым советам при приеме к защите диссертационных работ предписано засчитывать статьи, опубликованные, начиная с февраля 2003 года, только при условии выполнения изложенных выше требований.

При подготовке статей к публикации в журнале просьба учитывать рекомендации ВАК Украины.

Редколлегия журнала