



КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСТРУКТУРНЫХ ФОЛЬГ

В. С. КУЧУК-ЯЦЕНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен процесс контактной стыковой сварки сопротивлением жаропрочного никелевого сплава Rene 80 с использованием наноструктурных фольг систем Ti-Al и Ag-Cu. Исследованы особенности формирования сварных соединений и их микроструктура. Показано распределение микротвердости в сварных соединениях.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, жаропрочный никелевый сплав, непровар, микротрещина, наноструктурная фольга, основной металл, зона термического влияния, распределение микротвердости, микроструктура

Научно-технический прогресс предъявляет все более высокие требования к жаропрочности материалов в сочетании с пластичностью, сопротивлением термической и малоцикловой усталости, устойчивостью против действия газовой среды, долговечностью. Это стимулирует развитие работ по разработке и внедрению новых сплавов, в частности жаропрочных литейных сплавов на никелевой основе.

Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе эффективно применяются в промышленности как материал для деталей газотурбинных двигателей [1, 2]. С учетом одного из способов повышения уровня свойств (оптимизации легирования) предложен экспериментальный литейный жаропрочный сплав на никелевой основе, химический состав которого следующий, мас. %: 0,17 C; 18,0 Cr; 8,5 Co; 1,8 Mo; 2,6 W; 0,9 Nb; 3,4 Ti; 3,5 Al; 1,75 Ta; $0,5 \leq \text{Fe}$; Ni — остальное. Отличительной особенностью этого сплава является повышенное содержание алюминия, титана (соответственно 3,5 и 3,4 мас. %) и других легирующих элементов.

Металлографические исследования показали, что структура сплава типична для литого металла (рис. 1). Основу составляют дендриты γ -фазы, представляющие собой сложнелегированный твердый раствор на основе никеля. В междендритном пространстве располагаются фазы двух видов. Очевидно, это γ' -фаза на основе соединения $(\text{Ni}, \text{Cr})_3(\text{Ti}, \text{Al})$ и карбиды типа MeC, способные создавать такие элементы, как титан, тантал, ниобий. Местоположение этих фаз свидетельствует о том, что выделение их происходило при кристаллизации междендритного расплава с γ' -фазы и карбидов. Единичные включения этих фаз обнаружены и в объеме дендритов.

Размеры γ' -фазы и карбидов больше, чем таковые при дисперсионном выделении из твердого раствора. Это, а также преимущественное расположение по границам зерен, меняет их роль в укреплении сплава. Уровень жаропрочности определяет замедление зернограничного скольжения.

Внедрение новых сплавов осложняется проблемой получения их неразъемных соединений между собой и с другими материалами. Сложное легирование химически активными элементами и термическая нестабильность при высоких температурах вызывает определенные трудности при сварке жаропрочных сплавов.

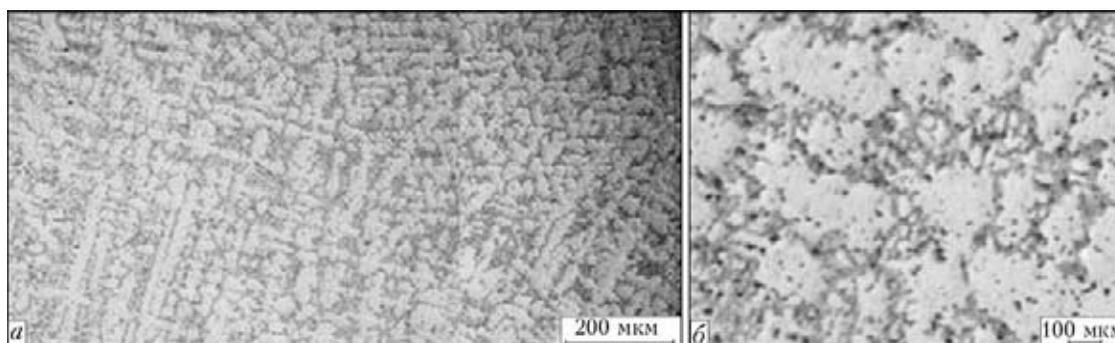


Рис. 1. Микроструктуры (а, б) литейного жаропрочного никелевого сплава Rene 80

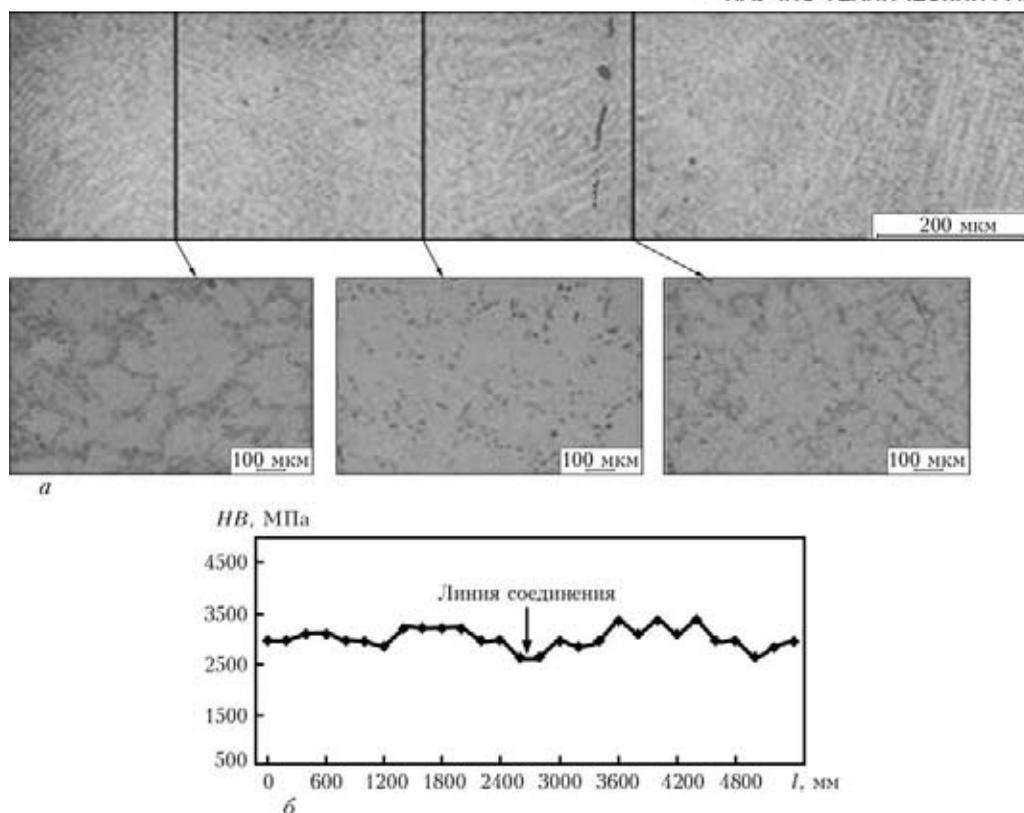


Рис. 2. Микроструктура (а) и распределение микротвердости в соединении жаропрочного сплава, полученного без использования наноструктурных фольг (б)

Контактная стыковая сварка (КСС) обеспечивает локальный высокоскоростной ввод тепла в зону соединения [3]. С учетом опыта предыдущих разработок по КСС таких сложносвариваемых материалов [4, 5] предложено осуществлять сварку жаропрочного никелевого сплава с использованием наноструктурных фольг.

В данной работе использовали наноструктурные фольги систем Ti–Al и Ag–Cu. Производство подобных наноструктурных фольг на основе парофазной технологии освоено в ИЭС им. Е. О. Патона [6].

Фольга системы Ti–Al представляет собой многослойную композицию из чередующихся слоев титана и алюминия, отвечающих стехиометрическому составу γ' -Ti–Al. Нагрев такой фольги до температуры приблизительно 300 °С приводит к взаимодействию титана и алюминия с образованием интерметаллида. Реакция взаимодействия развивается с большой скоростью и сопровождается выделением дополнительного тепла.

Фольга системы Ag–Cu по составу близка к эвтектическому состоянию сплавов системы Ag–Cu. Температура плавления эвтектики составляет 779 °С [7]. Образование на контактной границе расплава при температуре, меньшей температуры плавления сплава, благоприятно влияет на формирование соединения.

КСС проводили на модернизированной установке «Schlatter». Максимальная мощность установки

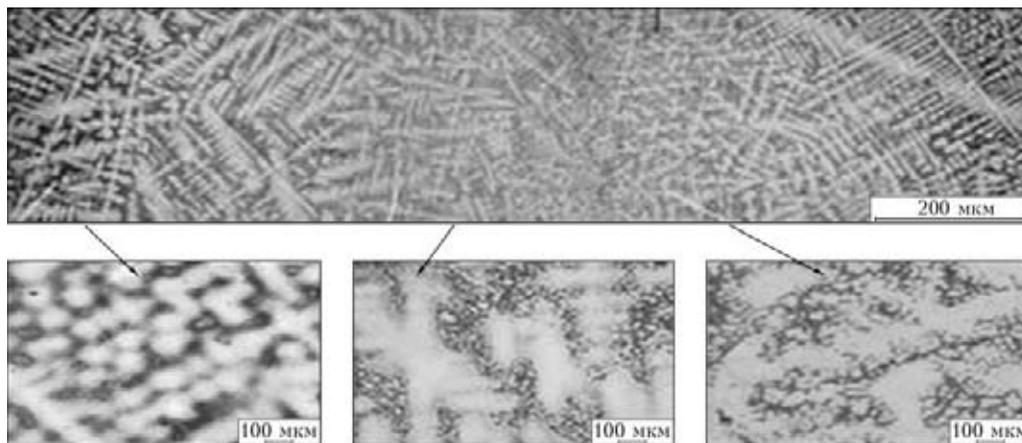
составляла 25 кВ·А, усилие осадки — 800 МПа. Сварку образцов размером 10×10×100 мм осуществляли на воздухе при давлении 2 МПа, сварочном токе 4...5 кА и времени сварки 3...5 с.

Анализ микроструктуры и химической неоднородности соединений проводили на оптическом микроскопе «НЕОФОТ 32» и растровом электронном микроскопе ISM-840 с микроанализатором Link-system.

Для оценки механических свойств сварных соединений определяли распределение микротвердости на микронзондовой компьютеризованной системе «Микрон–гамма».

При КСС сплава в однородном соединении без использования фольг в зоне соединения зафиксированы дефекты — непровары, микротрещины (рис. 2). Вероятной причиной неудовлетворительного формирования соединений является неравномерный нагрев образцов.

В зоне термического влияния полученного соединения отмечено следующее (рис. 2). К основному металлу с древовидными дендритами примыкает участок с равновесными зернами γ' -фазы. Количество карбидов и γ' -фазы при этом сохраняется. На примыкающем к шву участке количество карбидов и γ' -фазы значительно уменьшается. По границам зерен обнаружены единичные выделения этих фаз. Далее дендритная структура и количество карбидов и γ' -фазы восстанавливаются.



a

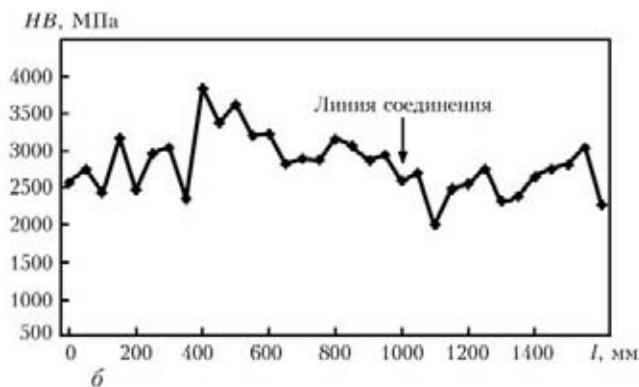
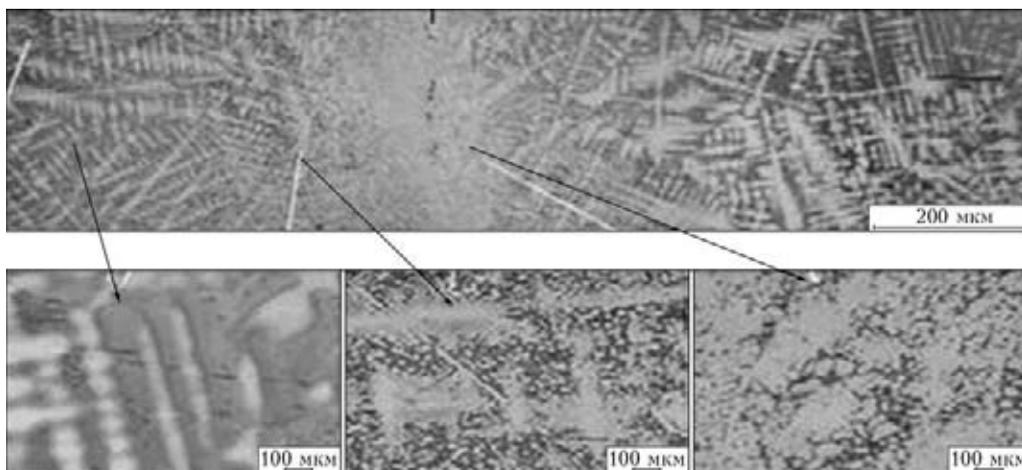


Рис. 3. Микроструктура (*a*) и распределение микротвердости в соединении жаропрочного сплава, полученного с использованием наноструктурной фольги системы Ti–Al (*б*)

Для оценки изменения прочностных характеристик в зоне термического воздействия было проанализировано распределение микротвердости.

Как видно, снижение микротвердости в основном металле от 3000 до 2500 МПа зафиксировано на участке с измельченными зёрнами твёрдого



a

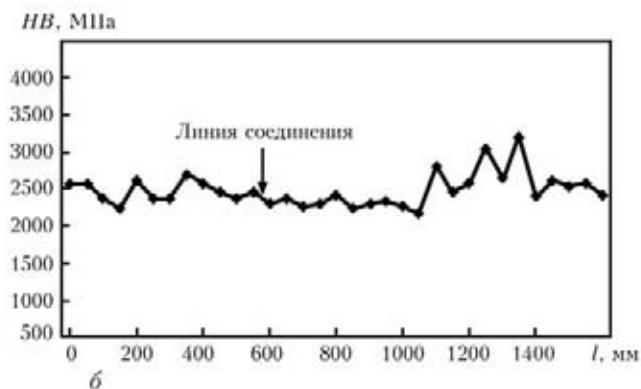


Рис. 4. Микроструктура (*a*) и распределение микротвердости в соединении жаропрочного сплава, полученного с использованием наноструктурной фольги системы Ag–Cu (*б*)



раствора, который формируется по линии соединения (см. рис. 2). Увеличение микротвердости выше 3000 МПа происходит на участке частичного растворения и, вероятно, дальнейшего дисперсионного выделения упрочняющей γ' -фазы в твердом растворе (см. рис. 2).

На следующем этапе получены сварные соединения сплава с использованием наноструктурных фольг систем Ti–Al, Ag–Cu.

В зоне термического влияния соединений обнаружен распад пересыщенного твердого раствора в междендритных объемах металла и формирование упрочняющей γ' -фазы (рис. 3, 4). В срединной части термомеханическое воздействие приводит к измельчению структуры.

В соединении, полученном с использованием фольги системы Ti–Al, сохраняются древовидные дендриты, фрагменты фольги в шве не зафиксированы (см. рис. 3), а в соединениях, полученных с использованием фольги системы Ag–Cu, отмечены равноосные зерна (см. рис. 4). Микроструктура в этом случае является результатом твердожидкого взаимодействия эвтектического расплава системы Ag–Cu с основным металлом сплава.

Сравнительный анализ распределения микротвердости показал, что в срединной части соединения, полученного с использованием фольги системы Ti–Al, микротвердость возрастает по от-

ношению к основному металлу и составляет около 3000 МПа. В то же время в срединной части соединения, выполненного с применением фольги системы Ag–Cu, микротвердость ниже, чем в основном металле, и составляет около 2250 МПа.

Таким образом, использование наноструктурных фольг при КСС жаропрочного никелевого сплава позволяет обеспечить равномерный высококонцентрированный нагрев зоны соединения и снизить температуру процесса, что предотвращает разупрочнение основного металла.

1. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1969. — 752 с.
2. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
3. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
4. Особенности контактной стыковой сварки алюминиевых сплавов с использованием наноструктурных алюминий-никелевых и алюминий-медных фольг / В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швеи, А. Г. Сахацкий, А. А. Наконечный // Свароч. пр-во. — 2007. — № 9. — С. 12–14.
5. Особенности контактной сварки алюминидов титана с использованием нанослойных алюминий-титановых фольг / В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швеи, А. Г. Сахацкий, А. А. Наконечный // Автомат. сварка. — 2008. — № 6. — С. 5–7.
6. Мовчан Б. А. Неорганические материалы, осажденные из паровой фазы в вакууме // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 318–332.
7. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / Под ред. С. В. Шухардина. — М.: Наука, 1979. — 248 с.

The process of resistance flash-butt welding of high-temperature nickel alloy Rene80 using nano-structured foils of Ti–Al and Ag–Cu system is considered. Features of welded joint formation and their microstructure are studied. Microhardness distribution in welded joints is shown.

Поступила в редакцию 24.06.2011

Шестая МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА ТЕРМООБРАБОТКА

25–27 сентября 2012

Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 5

Основные разделы:

- Промышленные печи: муфельные, вакуумные, плавильные, шахтные, камерные, электропечи
- Индукционный нагрев: ТВЧ продукция, индукционные печи
- Оборудование для химико-термической обработки: азотирования, цементации и т. д.
- Закалочное оборудование, масла и среды
- Лабораторные печи, сушильные шкафы
- Оснастка для термического оборудования
- Размерная и поверхностная обработка: формообразование, напыление
- Автоматизация термообработки, системы управления, контроль качества, метрологические измерения
- Энергосберегающие технологии термических производств

Контакты: ООО «Выставочная компания «Мир-Экспо»

Россия, 115533, пр-т Андропова, 22

Тел./факс: 8 499 618-0565, 8 499 618-36-83

E-mail: info@htexporus.ru