



МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН77ТЮР

Е. Н. ЕРЕМИН, д-р техн. наук (Омский гос. техн. ун-т, РФ)

Для изготовления кольцевых заготовок, используемых в авиационном двигателестроении, предложено применять электрошлаковую сварку комбинированным электродом с модифицированием металла шва дисперсными частицами карбонитрида титана. Приведены результаты исследований металла шва при сварке сплава ХН77ТЮР. Показаны преимущества новой технологии сварки.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, жаропрочный никелевый сплав, модифицирование, структура, механические свойства

Изделия ответственного назначения, изготавливаемые из жаропрочных сплавов, широко применяются в авиационном двигателестроении. Производство заготовок таких изделий в сварном варианте позволяет существенно повысить коэффициент использования дорогостоящих сплавов. Однако такие сплавы характеризуются низкой свариваемостью, и поэтому заготовки изготавливаются преимущественно различными способами горячего передела — ковкой, прошивкой, раскаткой, что обуславливает высокую трудоемкость их производства и значительный расход металла при механической обработке. Применение указанных технологических процессов является вынужденным решением, к которому прибегают из-за низкого качества сварных соединений. Поэтому изыскание технологии изготовления таких заготовок в сварном варианте является весьма актуальной задачей.

В этом отношении перспективно применение электрошлаковой сварки (ЭШС), с помощью которой выполняют однопроходную сварку конструкций различной толщины. Однако широко рекомендовавшие себя способы ЭШС пластинчатым, проволочным и пластинчато-проволочным электродами не всегда обеспечивают необходимое качество сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов.

С целью совершенствования технологии ЭШС выполняли «расцепленным» комбинированным электродом с применением специализированной установки, укомплектованной источником питания ТШС-3000-1 [1, 2]. Осуществляется одновременный ввод в шлаковую ванну неплавящегося и плавящегося электродов. При этом ис-

пользуют устройства сигнализации оплавления корня шва и вывода усадочной раковины.

Отработку технологии процесса ЭШС комбинированным электродом проводили на образцах из сплава ЭИ-437БУВД (ХН77ТЮР) толщиной 22...43 мм. В качестве неплавящегося электрода использовали вольфрамовый пруток диаметром 10 мм. Плавящимся электродом служила проволока ЭП-533 диаметром 3 мм.

Как известно, большое влияние на качество металла шва и формирование шва оказывают флюсы. Наименьший угар титана и алюминия — основных легирующих элементов жаропрочного сплава, образующих γ' -фазу, — обеспечивают флюсы АНФ-7 и АНФ-1. В связи с этим их чаще используют при сварке сплавов, легированных этими элементами [3]. Однако флюс АНФ-7 является гигроскопичным, поэтому требуется частое прокалывание при высоких температурах. Флюс АНФ-1 имеет высокую температуру плавления, что вызывает несплавление свариваемых кромок. В этом отношении флюс АНФ-21 системы $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, предназначенный для электрошлакового переплава титансодержащих сталей, также перспективен и для сварки: он не гигроскопичен, имеет пониженную температуру плавления и обеспечивает высокую температуру шлаковой ванны [4].

Оценку химического состава металла шва по основным легирующим элементам, ответственным за свойства сплава, осуществляли на оптико-эмиссионном анализаторе ARG-MET-930SP.

Результаты химического анализа металла электрода и шва при сварке сплава ХН77ТЮР под флюсом АНФ-21, приведенные в табл. 1, показали целесообразность использования данного флюса, поскольку при этом обеспечиваются химический состав металла шва в соответствии с требованиями технических условий, а также качественное формирование шва.



Таблица 1. Содержание (мас. %) основных легирующих элементов в сплаве ХН77ТЮР

Объект исследования	Al	Ti
Электрод	0,86	2,76
Шов	0,65...0,77	2,50...2,54
По техническим условиям	0,60...1,00	2,50...2,90

Недостатками сварки жаропрочных никелевых сплавов являются низкие механические свойства металла шва и его жаропрочность. В связи с этим с помощью металлографии провели исследование качества сварных соединений, а также испытания механические и на жаропрочность. Образцы проходили термическую обработку в соответствии с техническими условиями на основной металл: закалка при 1080 °С в течение 8 ч, охлаждение на воздухе; старение при 700 °С в течение 16 ч, охлаждение на воздухе.

Результаты испытаний показали, что свойства металла шва, полученного с применением проволоки ЭП-533, не удовлетворяют требованиям технических условий по всем показателям. Кроме того, металл шва отличается низкой жаропрочностью при температуре 750 °С и нагрузке 350 МПа, которая составляет 60...70 % требуемой. Свойства металла околошовной зоны (ОШЗ) превышают свойства металла шва. Поэтому разрушение всегда происходит по шву — наиболее слабому месту сварного соединения.

Как утверждают авторы ряда работ [3, 5, 6], наиболее целесообразно использовать при сварке металлургические способы повышения свойств сварных соединений. К основному металлургическому приему следует отнести подавление столбчатого характера кристаллизации и измельчение кристаллической структуры путем легирования элементами-модификаторами [7, 8]. Кроме того, в случае образования равноосной структуры шва появляется возможность увеличить скорость сварки при неизменной погонной энергии [9].

В связи с этим для повышения свойств металла шва применено модифицирование металлической ванны дисперсными инокуляторами [10]. Использовали модификатор, в состав которого входят

дисперсные частицы карбонитрида титана (0,04 мас. %) [11]. Введение компонентов осуществляли путем переплава дополнительного трубчатого электрода на никелевой основе, внутренняя полость которого заполнена порошкообразным модификатором.

Результаты испытаний образцов из сплава ХН77ТЮР представлены в табл. 2.

Металлографическим методом исследовали место разрушения, размер зерна, распределение неметаллических включений и характер выделения упрочняющих фаз. Результаты исследований макроструктуры показали, что разрушение всех образцов носит межзеренный характер. Макроструктура образцов немодифицированного металла шва характеризуется развитой транскристаллизацией от зоны сплавления к оси (рис. 1, а). В средней части металла шва наблюдается наличие зоны встречи двух кристаллизующихся фронтов. Здесь столбчатые кристаллы имеют радиально-осевое направление с небольшим углом наклона. Границы зерен с таким расположением являются наиболее уязвимыми местами шва. Это хорошо видно на рельефе поверхностей излома металла шва, которые имеют блестящий камневидный вид без зон долома, что характеризует излом как хрупкий (рис. 2, а).

При исследовании мест разрушения образцов немодифицированного металла шва после длительных жаропрочных испытаний установлено, что оно всегда происходит в зоне направленной кристаллизации. Особенно низкой жаропрочностью отличается металл шва, у которого границы кристаллитов расположены перпендикулярно либо под небольшим углом к действию главных напряжений (рис. 2, б). Это можно объяснить тем, что важными факторами, определяющими качество и служебные свойства жаропрочных сплавов, являются фазовый состав, состояние границ зерен, размер зерна, степень однородности, а также морфология и топография включений [10, 12].

В макроструктуре модифицированного металла шва содержатся зерна, границы которых удалены приблизительно одинаково от центра (см.

Таблица 2. Результаты испытаний металла сварных соединений при ЭШС сплава ХН77ТЮР

Металл шва	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²	τ_{350}^{750} , ч
Немодифицированный шов	<u>830...856</u> 843	<u>676...689</u> 684	<u>9,2...9,8</u> 9,6	<u>12,3...13,1</u> 12,8	<u>0,22...0,29</u> 0,26	<u>31...42</u> 36
Металл ОШЗ	<u>934...940</u> 936	<u>718...726</u> 722	<u>12,2...13,4</u> 12,7	<u>14,8...16,1</u> 15,6	<u>0,32...0,38</u> 0,35	<u>46...51</u> 48
Модифицированный шов (TiN)	<u>982...1012</u> 996	<u>756...769</u> 762	<u>19,2...19,7</u> 19,4	<u>20,2...21,4</u> 20,7	<u>0,78...0,85</u> 0,81	<u>92...98</u> 94
Металл ОШЗ	<u>928...936</u> 931	<u>743...752</u> 748	<u>13,8...14,5</u> 14,2	<u>15,9...16,8</u> 16,4	<u>0,39...0,47</u> 0,44	<u>50...57</u> 53
Сплав ХН77ТЮР по ТУ	≥ 950	≥ 650	≥ 12	≥ 14	≥ 0,3	≥ 50

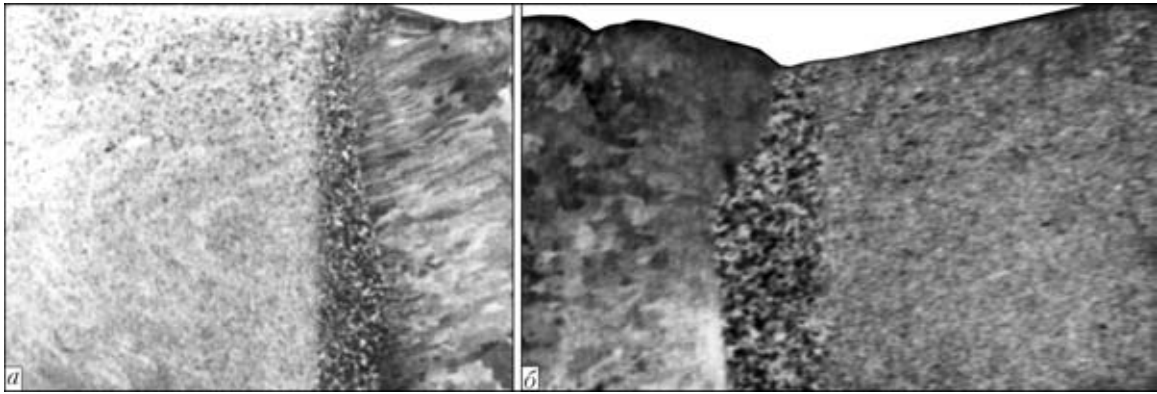


Рис. 1. Фрагменты макроструктуры сварных соединений, полученных ЭШС без модифицирования (*a*, $\times 0,5$) и с модифицированием (*б*, $\times 1,0$)

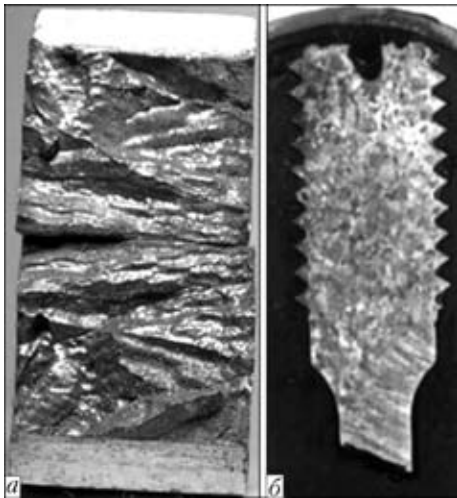


Рис. 2. Характер разрушения образцов немодифицированного металла шва после испытаний на ударную вязкость (*a*) и жаропрочность (*б*)

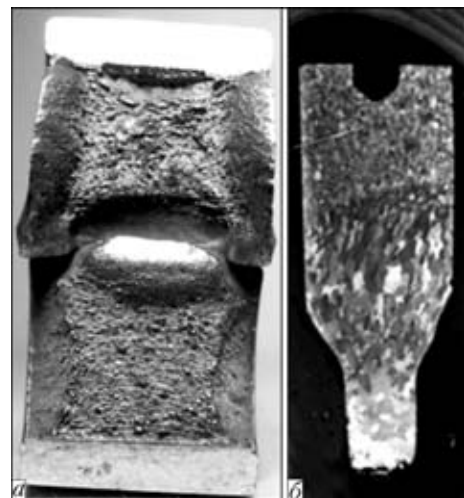


Рис. 3. Характер разрушения образцов модифицированного металла шва после испытаний на ударную вязкость (*a*) и жаропрочность (*б*)

рис. 1, *б*). Размер зерна при этом уменьшается до 1...2 мм. Дефектов металла шва на всех шлифах не обнаружено. Модифицирование металла шва приводит к существенному изменению макрорельефа изломов ударных образцов, в которых появляются боковые зоны и зоны долома, а поверхность становится мелкозернистой и матовой (рис. 3, *a*). Разрушение образцов во время длительных испытаний происходит в зоне равноосных относительно мелких зерен (рис. 3, *б*). Образование такой структуры, устраняющей зону «слабины» по оси шва, приводит к повышению технологической прочности, что позволяет увеличить в 2 раза скорость сварки.

Микроструктура немодифицированного металла шва характеризуется значительными объемами долями строчечных карбидов, иногда игольчатой формы, боридных эвтектических фаз на границах и мелких неметаллических включений вблизи границ (рис. 4, *a*). Подобная картина наблюдается и в ОШЗ. Боридные эвтектики, отличающиеся низкой температурой плавления, способствуют появлению кристаллизационных трещин при сварке.

Результаты исследований микроструктуры металла модифицированного шва (рис. 4, *б*) показали, что карбиды в этом случае скоагулированы и имеют компактную округлую форму. Они расположены большей частью на границах зерен, что, по-видимому, способствует их упрочнению и обуславливает повышенную жаропрочность металла. Содержание неметаллических включений в этом случае незначительно. Структура ОШЗ аналогична описанной выше, но вследствие более высокой скорости сварки имеет меньший размер зерна, что несколько повышает свойства сварного соединения в целом.

Изменение градиента температур и скорости перемещения фронта кристаллизации при модифицировании существенно влияет на дендритную структуру, размер составляющих и фазовый состав жаропрочных сплавов.

Дендритную структуру принято характеризовать дисперсностью — средним расстоянием между осями дендритов второго порядка и плотностью, которую в настоящей работе определяли по отношению суммарных длин отрезков осей и межосных пространств, выявляемых методом

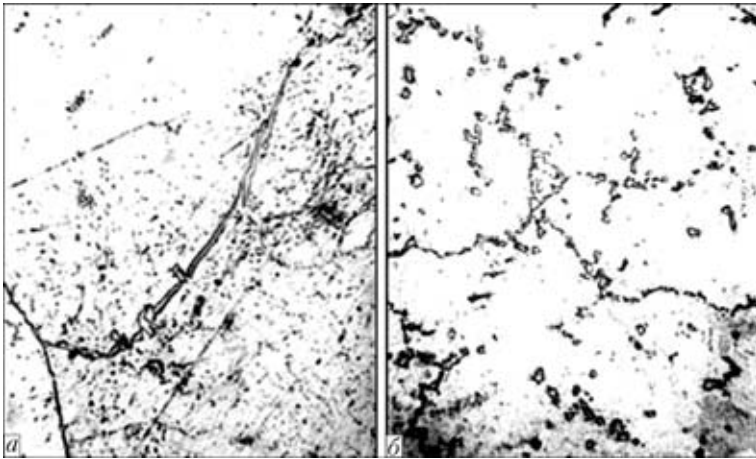


Рис. 4. Микроструктура металла шва, полученного без модифицирования (а, $\times 240$) и с модифицированием (б, $\times 520$)

Таблица 3. Коэффициент ликвации основных легирующих элементов сплава ХН77ТЮР

Металл шва	Al	Ti	Cr	Ni
Немодифицированный	1,06	1,94	0,92	1,11
Модифицированный	1,03	1,15	0,96	1,08

микрорентгеноспектрального анализа. Неодновременность кристаллизации металла в межосных пространствах создает ликвационную неоднородность его по химическому составу.

При изучении дендритной структуры сплава установлено, что с введением модификатора расстояние между осями дендритов второго порядка уменьшается от 43 до 21 мкм, плотность дендритной структуры возрастает от 1,3 до 1,9, а дисперсность увеличивается в 2,3 раза.

В связи с этим можно ожидать меньшее развитие дендритной ликвации. Обычно ликвация в сложных сплавах достаточно объективно оценивается соотношением концентраций элементов в пределах дендритной ячейки — $K_d = C_m/C_o$, где C_m — концентрация элемента в межосном пространстве, C_o — в оси дендрита.

Значения коэффициента ликвации K_d основных легирующих элементов сплава ХН77ТЮР, уста-

новленные с помощью рентгеновского микроанализатора MS-46 «Сатеса», приведены в табл. 3. Из таблицы следует, что дендритная ликвация алюминия, хрома и никеля незначительная и они равномерно распределены между осями и межосными пространствами. Ликвация же титана достаточна велика.

Если легирующий элемент имеет $K_d > 1$, то он концентрируется в межосных пространствах и, наоборот, оси дендритов обогащены легирующими элементами при $K_d < 1$. В соответствии с этим такие γ' -образующие элементы, как алюминий и титан, оттесняются в межосные пространства, а хром концентрируется преимущественно в осях дендритов. Выделение в межосное прост-

ранство фаз объединяет их состав, что также способствует снижению жаропрочности сплавов [13]. Кроме того, вследствие значительной ликвации элементов и скопления их в карбидах и боридах эвтектики твердый раствор обедняется, а содержание γ' -фазы уменьшается до 46 об. %, что также существенно снижает жаропрочность.

После модифицирования титан, имеющий высокую склонность к ликвации, перераспределяется более равномерно, обеспечивая заметное выравнивание состава между осями дендритов и межосными участками. При этом наблюдается тенденция к формированию более однородной структуры по сравнению с немодифицированным сплавом. Это объясняется тем, что модифицирование активизирует диффузионные процессы в расплаве и тем самым способствует более полному устранению ликвации.

Исследование γ' -фазы (рис. 5) показало, что образующиеся при распаде твердого раствора выделения упрочняющей фазы уже в литом состоянии являются достаточно мелкими и равномерно распределенными для модифицированного металла шва, кристаллизующегося при относительно высоких скоростях.

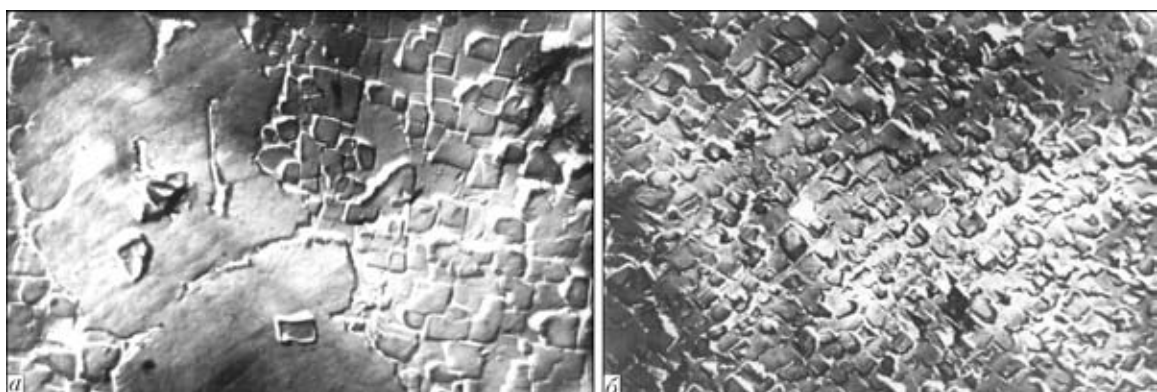


Рис. 5. Микроструктура металла шва с γ' -фазой ($\times 8000$) без модифицирования (а) и с модифицированием (б)

В структуре немодифицированного металла шва наблюдаются обширные выделения вторичных фаз, занимающих значительную часть γ -матрицы, в связи с этим содержание γ' -фазы здесь существенно меньше, чем в модифицированном металле шва.

Таким образом, применение усовершенствованной технологии ЭШС позволяет существенно экономить материальные и денежные ресурсы за счет повышения качества и снижения трудоемкости изготовления кольцевых заготовок из жаропрочных сплавов в авиационном двигателестроении.

1. Еремин Е. Н. Применение комбинированного электрода при электрошлаковой сварке материалов малых толщин // Автомат. сварка. — 2005. — № 12. — С. 54–56.
2. Еремин Е. Н. Устройство для формирования шва при электрошлаковой сварке // Там же. — 2005. — № 9. — С. 50–51.
3. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. — М.: Машиностроение, 1966. — 430 с.
4. *Металлургия электрошлакового процесса* / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 248 с.

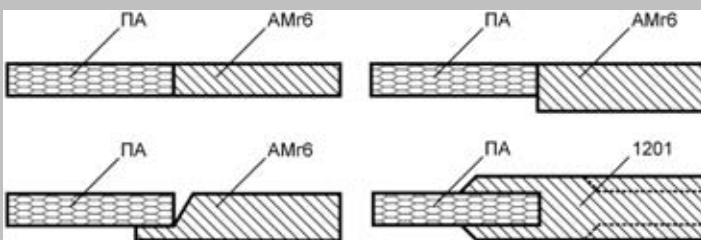
For manufacture of circular billets used in aircraft engine construction, it is proposed to apply electroslag welding with a combined electrode with weld metal modification by dispersed particles of titanium carbonitride. Results of studying the weld metal in welding Kh77TYuR alloy are given. Advantages of the new welding technology are demonstrated.

5. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1969. — 752 с.
6. Шоршоров М. Х. Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов. — М.: Машиностроение, 1973. — 224 с.
7. Земзин В. Н. Жаропрочность сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1972. — 272 с.
8. Башнин Ю. А., Исакова В. Н., Масленкова Е. А. Влияние переплавных процессов на структуру и свойства сталей. — М.: Металлургия, 1991. — 240 с.
9. Дудко Д. А., Сидорук В. С., Тягун-Белоус Г. С. Пути снижения тепловложения в свариваемый металл при электрошлаковой сварке толстостенных конструкций // Автомат. сварка. — 1982. — № 10. — С. 48–50.
10. Сабуров В. П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов // Литейн. произ-во. — 1998. — № 9. — С. 7–8.
11. Еремин Е. Н. Применение электрошлакового переплава для регенерации отходов жаропрочных сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 2. — С. 23–27.
12. Логунов А. В. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов / А. В. Логунов, Н. В. Петрушин, Е. А. Кулешова, Ю. М. Должанский // Металловедение и терм. обработка мета. — 1981. — № 6. — С. 16–20.
13. Кишкин С. Т. Особенности структурных превращений жаропрочного никелевого сплава в процессе высокотемпературного нагрева // Изв. АН СССР. Металлы. — 1980. — № 6. — С. 190.

Поступила в редакцию 07.02.2007

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ ПЕНОАЛЮМИНИЯ

Пеноалюминий (ПА) характеризуется уникальным сочетанием таких свойств, которыми не обладает сегодня ни один конструкционный материал, — негорючесть, нетоксичность, низкие звуко-, тепло- и электропроводность, малая гигроскопичность, легкость, хорошие обрабатываемость и внешний вид. Особенно привлекателен ПА в сравнении с другими материалами по массе при условии одинаковой жесткости конструкции.



С целью расширения областей применения ПА и номенклатуры изделий из него были проведены исследования с использованием различных видов сварки плавлением. Получены соединения листов ПА с монолитными алюминиевыми сплавами различных систем легирования. В качестве заготовок использовали листы ПА плотностью 0,6...0,7 г/см³ толщиной 4 мм, полученные на основе сплава 1995 (система легирования Al-Zn-Mg).

Результаты экспериментов показали, что соединение заготовок из ПА между собой с использованием сварки плавлением не представляется возможным. Была разработана технология соединения ПА через вставки из серийных алюминиевых сплавов. Аналогичная схема соединения может применяться и в других сварных конструкциях, где используются заготовки, полученные как по традиционной технологии, так и из ПА. Разработаны различные схемы конструктивного оформления кромок для соединения заготовок одинаковой и различной толщины.

Контакты: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 7. Тел.: (38044) 287 44 06.
Факс: (38044) 287 12 83; 287 46 30