

УДК 621.791.05 + 669

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН45МВТЮБР-ИД ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

*С.Л. Исаев*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Определены оптимальные параметры электронно-лучевой сварки (ЭЛС) жаропрочного сплава марки ХН45МВТЮБР-ИД толщиной 4,5 мм, выполненной без технологической подкладки, исследовано влияние режимов ЭЛС на образование дефектов. Склонность сплава ХН45МВТЮБР-ИД к образованию дефектов исследовали на образце-имитаторе, поделенном на семь равных участков при скоростях сварки 7 и 11 мм/с. Для оценки качества сварки каждый из участков подвергался рентгенографическому контролю, разрезке и металлографическому исследованию сварных швов, определению микротвердости и наличия дефектов. Полученные значения параметров сварки для стыкового соединения обеспечивают требуемое качество и размеры сварного шва.*

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, жаропрочный сплав, скорость сварки, микротвердость, оптимальный режим сварки.

### Введение

За последние годы в авиационной технике заметно расширилось применение жаропрочных сплавов в тяжело нагруженных крупногабаритных силовых узлах и агрегатах, работающих главным образом в условиях малоцикловых нагрузок при высоком уровне напряжений. Наибольший интерес при этом представляют стали и сплавы с пределом прочности 1000...1200 МПа.

Одним из основных и наиболее эффективных методов соединения деталей в конструкциях ответственного назначения является сварка. Сварные соединения характеризуются определенным комплексом механических и эксплуатационных свойств, которые могут существенно отличаться от свойств основного металла. Надежность и долговечность сварных конструкций, как правило, определяются качеством и структурой металла шва и зоны термического влияния и конструктивным оформлением места соединения.

Для получения неразъемных соединений жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР-ИД перспективно применение ЭЛС, которая обеспечивает минимальную ширину шва и высокое качество сварного соединения. Однако процесс ЭЛС имеет ряд трудностей и нерешенных проблем в получении бездефектных сварных соединений, к числу которых можно отнести возможность образования в металле сварных соединений трещин, пор, прожогов, вызывающих снижение надежности и эксплуатационных характеристик изделия.

Особенностями процесса ЭЛС являются надежная вакуумная защита расплавленного и разогретого металла от газов воздуха, возможность сварки за один

---

*Сергей Леонидович Исаев, аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».*

проход деталей больших толщин, малые размеры шва и зоны термического влияния. Все эти особенности определяют целесообразность применения ЭЛС [1, 2].

Целью данной работы является изучение и повышение стабильности формирования сварных соединений сплава ХН45МВТЮБР-ИД толщиной 4,5 мм за счет изменения различных энергетических и технологических параметров (тока луча, тока фокусировки, скорости сварки) и выбора оптимального режима электронно-лучевой сварки для данного сплава без технологического подкладного кольца [3].

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- изучался механизм проплавления сплава электронным пучком;
- выполнялись экспериментальные исследования влияния параметров режима сварки на качество и стабильность формирования сварных соединений при электронно-лучевой сварке;
- исследовалась структура и свойства сварных соединений.

### Материалы и методы исследования

Отработку режима сварки производили на образце-имитаторе натурального узла (рис. 1). Образец-имитатор был разбит на 7 равных участков.

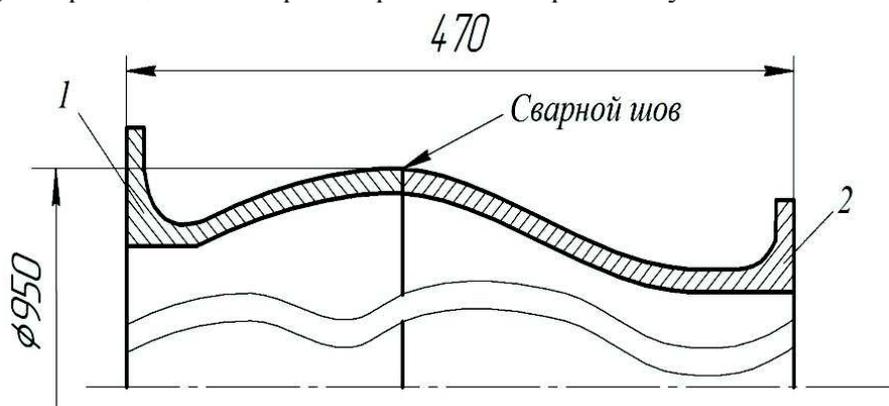


Рис. 1. Эскиз образца-имитатора:  
1 – нижняя часть; 2 – верхняя часть

Материал свариваемого образца-имитатора – сплав ХН45МВТЮБР-ИД, поставляемый по ТУ 14-1-3905-85. Основные структурные составляющие данного сплава – твердый раствор + интерметаллидные соединения типа  $(Ni, Me)_3$  (Al, Me) –  $\gamma'$ -фаза + карбиды типа  $Me_{23}C_6$ , карбид титана – TiC, нитрид титана – TiN [4, 5]. Химический состав сплава должен соответствовать ГОСТ 5632-72 (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав сплава ХН45МВТЮБР-ИД, % масс.

Хром	Никель	Молибден	Алюминий	Титан	Ниобий	Углерод
14,0–16,0	43,0–47,0	4,0–5,0	0,9–1,4	1,9–2,4	2,5–3,5	≤0,1

Электронно-лучевая сварка выполнялась на установке ЭЛУ-11 (рис. 2), укомплектованной универсальным сварочным манипулятором и электронно-лучевой аппаратурой ЭЛТА-60.15 мощностью 15 кВт, в которую входят электронная пушка с катодом косвенного подогрева и инверторный высоковольтный

источник питания. Контроль фокусировки электронного пучка производили на поверхности образца по наибольшей яркости пучка при токе луча 1 мА ( $I_0$ ). Рабочее расстояние от пушки до образца составило 300 мм [6].

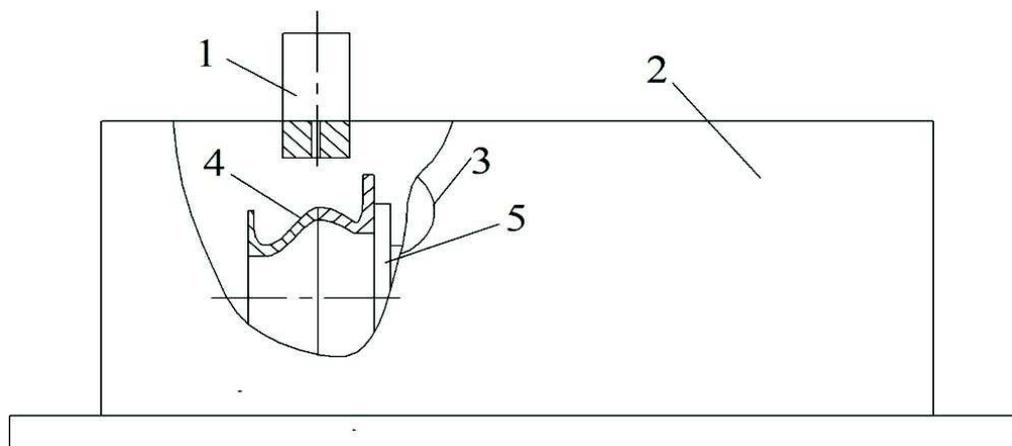


Рис. 2. Принципиальная схема установки для электронно-лучевой сварки:  
1 – электронно-лучевая пушка; 2 – камера установки; 3 – смотровое окно; 4 – образец-имитатор;  
5 – манипулятор

Установка предназначена для сварки электронным лучом в вакууме кольцевых швов на изделиях, расположенных в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также сварки изделий с продольными швами. Она позволяет производить сварку цилиндрических изделий под углом наклона планшайбы относительно горизонтальной оси вверх на  $90^\circ$ . Установка позволяет сваривать углеродистые стали толщиной до 45 мм, титан и его сплавы до 55 мм, алюминий и его сплавы толщиной до 60 мм при скоростях сварки 0,5–40 мм/с. Образец-имитатор для устранения остаточной намагниченности подвергали дополнительному размагничиванию, и он поступал на сварку с уровнем намагниченности не более 300 мкТл. Контроль производили микротеслометром МФ-24ФМ.

Рентгенографический контроль сварного шва производили на установке «Экстравольт 225/Р3000» с рентгеновской трубкой ТНХ225. Рентгеновский аппарат предназначен для промышленной дефектоскопии и представляет собой стационарный аппарат для проведения анализа промышленных изделий методом рентгеновской дефектоскопии в промышленных и научных лабораториях, а также в цеховых условиях.

Для металлографического анализа микроструктуры образцов использовался оптический микроскоп Axio Vert A1 с анализатором микроструктуры поверхностных твердых тел Thixomet при различных увеличениях, а также электронный микроскоп JEOL-6390A. Исследованием производили с 600-кратным увеличением.

Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3, нагрузка на индентор составляла 50 г. Измерения микротвердости проводились в поперечном сечении, начиная от верхнего края образца и до нижнего края.

## Результаты исследования и их обсуждение

При исследовании замерялись геометрические параметры шва, полученного при различных значениях тока луча, тока фокусирующей линзы и скорости сварки. Результаты измерения геометрических параметров относительно каждого режима сварки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты ЭЛС

№ образца	Скорость сварки, мм/с	Ток луча, мА	Ток фокусировки, мА	Ускоряющее напряжение, кВ	Ширина верхней области сварного шва, мм	Глубина сварного шва, мм	Выявленные дефекты
1	7	28	765	60	4,95	2,5	Непровар
2		28	776		5,9	3,6	Непровар
3		28	780		5,95	4,3	Непровар, поры
4		30	783		4,8	4,5	Отсутствуют
5	11	34	776		5,85	4,5	Проплав
6		32	780		6,3	4,5	Проплав
7		32	783		5,55	4,5	Проплав

Из табл. 2 видно, что на образце № 1 из-за недостаточного тока луча и тока фокусировки образовались непровар и нехарактерная форма шва.

На образце № 2 ток фокусировки по сравнению с образцом № 1 увеличили на 11 мА, вследствие этого глубина проплавления увеличилась, но опять же образовался непровар, ширина шва увеличилась на 1 мм.

На образце № 3 по сравнению с образцами № 1 и № 2 получили более характерную для ЭЛС форму шва, а также большую глубину проплавления по сравнению с предыдущими образцами, но все равно с данными параметрами проварить на всю глубину не удалось, ширина шва осталась такой же.

На образце № 4 ток фокусировки по сравнению с предыдущими образцами был 783 мА, а ток луча – 30 мА. Этого оказалось достаточно для того, чтобы проварить образец на всю глубину и уменьшить ширину шва.

На образцах № 5, № 6 и № 7 по сравнению с предыдущими образцами шов имеет более правильную форму, кромки проварились на всю глубину, но на всех образцах имеется проплав, что обусловлено завышенным током луча [7].

Исследование физико-механической однородности сварного соединения на образцах в целом оценивали методом измерения микротвердости основных его составляющих: основного металла, сварного шва в трех уровнях (на поверхности, в середине и в корне шва) и околошовной зоны (ОШЗ). Результаты замера приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что характер распределения значений микротвердости по зонам сварного соединения качественно идентичен. Микротвердость ОШЗ имеет минимальные значения ввиду образования переходной зоны от сварного шва к основному металлу. Это обусловлено переходом карбидов и интерметаллидов из твердого раствора на границах зерен в результате изменения структуры от действия температуры [8].

## Результаты замера микротвердости

№ образца	Материал основы, кгс/мм <sup>2</sup>	ОШЗ, кгс/мм <sup>2</sup>	Сварной шов, кгс/мм <sup>2</sup>		
			На поверхности	В середине	В корне шва
1	337	276	286	311	310
2	353	302	262	299	317
3	364	278	288	314	322
4	349	306	291	307	306
5	304	281	314	306	300
6	366	289	311	290	302
7	334	299	296	295	316

Из полученных результатов следует, что бездефектное соединение получается при скорости сварки 7 мм/с на образце № 4. Оптимальные геометрические параметры сварного шва сплава ХН45МВТЮБР-ИД представлены в табл. 4.

Таблица 4

## Оптимальные параметры для сварки

Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Параметры сварного шва	
		Ширина ванны, мм	Глубина провара, мм
30±1	783	4,8	4,0

Микроструктура с геометрическими параметрами сварного шва на режимах табл. 4 представлена на рис. 3.

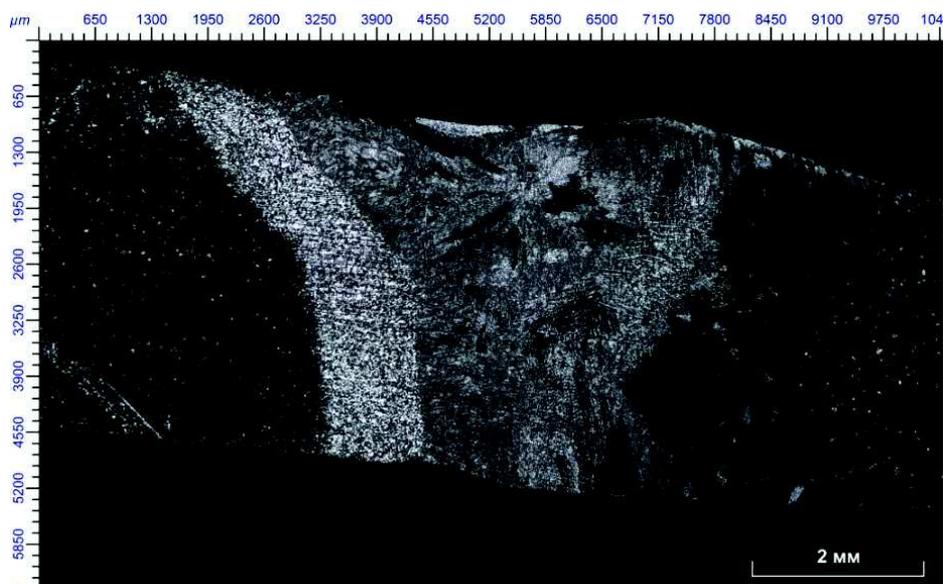
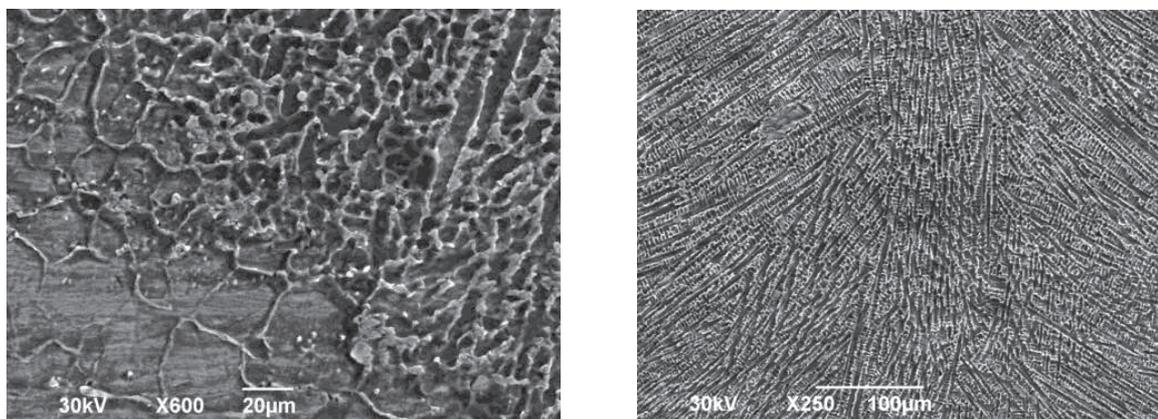


Рис. 3. Сварной шов

Данные параметры сварки обеспечивают необходимую глубину проплавления для полного провара с минимальной шириной ванны и исключают образование дефектов.

На электронном микроскопе была исследована микроструктура сварного шва образца № 4, представленная на рис. 4.

По центру сварного шва видна столбчатая дендритная структура литого сплава. В микроструктуре сварного шва наблюдается повышенная травимость в околошовной зоне и увеличенное до 7–8 баллов зерно по сравнению с основным материалом, где величина зерна соответствует 9-му баллу шкалы ГОСТ 5639-82.



*а*

*б*

Рис. 4. Микроструктура образца № 4:  
*а* – в околошовной зоне; *б* – в сварном шве

### **Заключение**

В работе исследованы образцы сварных швов из жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР-ИД, полученные электронно-лучевой сваркой на установке ЭЛУ-11. Определены геометрические размеры сварных швов, исследована макро- и микроструктура зон сварки и измерена микротвердость. Результаты комплексных исследований позволяют выбрать оптимальный режим электронно-лучевой сварки.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Сварные швы сформированы с мелкодисперсной дендритной структурой.
2. Исследование сварных швов на микроскопе позволило выявить такие дефекты, как непровар и поры.
3. Замеры микротвердости показали качественно одинаковые результаты по всем зонам сварного шва.
4. Глубина сварного шва увеличивается с возрастанием тока луча, который определяется мощностью в электронном пучке.

5. Оптимальным режимом электронно-лучевой сварки является режим с параметрами: скорость сварки 7 мм/с, ток луча 30 мА, ток фокусировки 783 мА, при котором образец № 4 проварился полностью и не было выявлено дефектов.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Кайдалов А.А.* Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. 2- изд., перераб. и доп. – Киев: Экотехнология, 2004. – 260 с.
2. *Dance V. G. I.*: 'Welding the unweldable: electron beam welding of crack-sensitive alloys'. TWI Connect, 2000, 106 p.
3. Электронно-лучевая сварка со сквозным проплавлением жаропрочных сплавов на никелевой основе / Д.В. Клиновой, Б.А. Задерий, С.С. Котенко, М.В. Буньков, Ю.Д. Панфилов, С.Ф. Во-

- ловец // Электронно-лучевая сварка: материалы конференции. – М., 1993. – Сб. 2. – С. 110–115.
4. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение. – М.: ИД Альянс, 2011. – 644 с.
  5. Keehan E., Karlsson L., Andren H.O. Influence of C, Mn and Ni on strong steel weld metals // Part 1, Effect of nickel. Sci. Technol. Weld. Join. 2006. Vol. 11. – P. 1–8.
  6. Назаренко О.К., Загорников В.И. Влияние рабочего расстояния сварочной электронной пушки на геометрию сварочного шва // Автоматическая сварка. – 2010. – № 5. – С. 32–35.
  7. Беленький В.Я., Трушников Д.Н., Шварев А.В. Некоторые аспекты контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением // Сварка и диагностика. – 2010. – № 1. – С. 41–44.
  8. Rai R., Burgardt P., Milewski J.O., Lienert T.J., DebRoy T. Heat transfer and fluid flow during EBW of 21 Cr–6Ni–9Mn steel and Ti–6Al–4V alloy, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 42, no. 2, pp. 1–12, Jan. 2009.

*Статья поступила в редакцию 3 октября 2016 г.*

## **STUDY OF WELDED JOINTS OF HIGH-TEMPERATURE ALLOYS CR15NI45MO5W1TI2AL1NB3P MADE BY ELECTRON-BEAM WELDING**

***S.L. Isaev***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

*Optimal parameters of electron beam welding (EBW) of heat-resistant alloy of the Cr15Ni45Mo5W1Ti2Al1Nb3P brand with thickness of 4.5 mm made without lining technology were defined. The effect of the EBW mode on the formation of defects was studied. Propensity of Cr15Ni45Mo5W1Ti2Al1Nb3P alloy to the defects formation was investigated on the sample-simulator divided into seven equal portions at welding speeds of 7 mm/s and 11 mm/s. To evaluate the quality of welding, each of the samples was subjected to X-ray inspection, cutting and metallographic investigation with the definition of the parameters of welds, micro hardness and the defects presence. The obtained values of the welding parameters for a butt joint provide the required quality and the size of the weld.*

***Keywords:*** *electron-beam welding, heat-resistant alloy, welding speed, microhardness, optimal welding conditions.*