



УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-4-4

СВАРКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

В.И. Лукин

доктор технических наук

В.Г. Ковальчук

Е.В. Голев

Е.А. Ходакова

Май 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

В.И. Лукин¹, В.Г. Ковальчук¹, Е.В. Голев¹, Е.А. Ходакова¹

СВАРКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Выбраны режимы электронно-лучевой, автоматической и ручной аргоно-дуговой сварки новых коррозионностойких сталей, имеющих различные методы упрочнения, присадочные материалы, исследованы технологические, механические свойства и структуры сварных соединений.

Стали ВНС-72 и ВНС-73-Ш легированы совместно углеродом и азотом и имеют преимущество перед углеродсодержащими сталями по комплексу механических и коррозионных свойств. Сварные узлы из стали ВНС-72 применяются после полной термической обработки соединений. Сварка деталей из стали ВНС-73-Ш осуществляется как до проведения упрочняющей термообработки, так и в термически упрочненном состоянии. Сварка стали ВНС-63-Ш проводится в отожженном состоянии, сварные изделия помимо термической обработки подвергаются цементации.

Ключевые слова: *аргоно-дуговая сварка, сварные соединения, термическая обработка, стойкость к образованию горячих трещин, прочность, ударная вязкость, коррозионная стойкость.*

V.I. Lukin, V.G. Kovalchuk, E.V. Golev, E.A. Khodakova

WELDING OF HIGH-STRENGTH CORROSION-RESISTANT STAINLESS STEELS

The modes of electron beam, automatic and manual argon-arc welding of new corrosion-resistant steels hardened by various processes and filler materials were chosen; processing characteristics, mechanical properties and structures of welded joints were investigated.

VNS-72 and VNS-73-Sh steels alloyed with carbon and nitrogen are superior to carbon-bearing alloys in the complex of mechanical and corrosion properties. Welded joints from VNS-72 steel are applied after full heat treatment of joints. Welding of parts from VNS-73-Sh steel is carried out both prior to strengthening heat treatment and in heat-treated state. Welding of VNS-63-Sh steel is carried out in the annealed state; besides heat treatment, welded products are subjected to cementation.

Keywords: *argon-arc welding, welded joints, heat treatment, resistance to hot cracking, strength, fracture toughness, corrosion resistance.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Высокопрочные стали применяют в конструкциях авиакосмической техники, где важно уменьшение массы. Основные требования, предъявляемые к сталям такого типа, сводятся к следующим: необходимая прочность, достаточная пластичность, хорошая ударная вязкость, повышенная длительная прочность, хорошая свариваемость, а для коррозионностойкой стали – высокая коррозионная стойкость [1–4].

Обладая высокой прочностью, удовлетворительной пластичностью и вязкостью, высокопрочная коррозионностойкая сталь ВНС-63-Ш является перспективным материалом для сварных конструкций, работающих в общеклиматических условиях. Однако сварка плавлением может оказывать значительное влияние на ее структуру и свойства.

Коррозионностойкие стали ВНС-72 и ВНС-73-Ш, легированные совместно углеродом и азотом, имеют преимущество перед углеродсодержащими сталями по комплексу механических и коррозионностойких свойств, поэтому являются перспективным материалом для высоконагруженных сварных конструкций.

Материалы и методы

Образцы для исследований изготавливали из прессованных прутков сечениями 150×150 мм (стали ВНС-72, ВНС-73-Ш) и \varnothing 50 мм (сталь ВНС-63-Ш). Часть прутков ковали на сутунки, прокатывали на листы толщиной 16 и 3 мм. Лист толщиной 3 мм резали на заготовки для исследования стойкости к образованию горячих трещин и на «лапшу» для сварки. На заготовках толщиной 16 мм механически обрабатывали кромки под сварку (U-образная разделка), сваривали с использованием источника питания сварочной дуги Precision TIG 375 ручной аргоно-дуговой сваркой с присадочными материалами для исследования механических свойств, коррозионной стойкости и структуры. В качестве присадочных материалов для сварки стали ВНС-63-Ш использовали «лапшу» из основного материала [5–9], для стали ВНС-72 выбраны промышленные сварочные проволоки марок Св-06Х13Н6М4К8Б (ЭК43), Св-08Х14Н7КВМ и Св-09Х14Н8М2 (ЭП509), а также «лапша» из стали марки 15Х15Н4ГАМ (ВНС-72). Ручная аргоно-дуговая сварка стали ВНС-73-Ш осуществлялась с присадочным материалом марки 08Х14Н7КВМ. Электронно-лучевая сварка стали ВНС-73-Ш проводилась на установке ЭЛУ-20М, оснащенной системой программного управления основными параметрами сварки и энергетическим блоком SEO Tech 60/30 с мощностью 30 кВт при ускоряющем напряжении 60 кВ.

Испытания на стойкость к образованию горячих трещин проводили по методике ЛТП1-6, при которой деформация образцов в процессе сварки производится растяжением металла шва. В качестве критерия используется максимальная (критическая) скорость деформации $V_{кр}$, при которой в образце не образуется трещина [10–16].

Результаты и обсуждение

Исследованы свариваемость стали ВНС-63-Ш применительно к изготовлению элементов легких опор, свойства сварных соединений при температурах -55, +20 и +300°С, проведены испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) сварных образцов

после полной термообработки при температурах 20 и 300°C и термообработки+цементации при температуре 300°C на базе $2 \cdot 10^7$ циклов.

По результатам испытания на МнЦУ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов определены средние значения пределов выносливости сварных образцов при различных температурах $\sigma_{-1}^{20^\circ} = 500$ МПа, $\sigma_{-1}^{300^\circ} = 400$ МПа (сварка+термообработка), $\sigma_{-1}^{300^\circ} = 440$ МПа (сварка+термообработка+цементация).

При проведении исследований сварных образцов из стали ВНС-63-Ш получены следующие механические свойства сварных соединений:

- $\sigma_{В.СВ}^{20^\circ} = 1505$ МПа ($\sigma_{В.СВ}^{20^\circ} = 0,96 \sigma_B^{20^\circ}$), $KCU_{В.СВ}^{20^\circ} = 320$ Дж/см²;
- $\sigma_{В.СВ}^{300^\circ} = 1225$ МПа ($\sigma_{В.СВ}^{300^\circ} = 0,9 \sigma_B^{300^\circ}$);
- $\sigma_{В.СВ}^{-55^\circ} = 1595$ МПа ($\sigma_{В.СВ}^{-55^\circ} = 0,99 \sigma_B^{-55^\circ}$), $KCU_{В.СВ}^{-55^\circ} = 137$ Дж/см².

Сварные соединения показали удовлетворительный уровень критической скорости деформации в процессе сварки стали ВНС-63-Ш в отожженном состоянии без присадочного материала – $V_{кр} = 5,2$ мм/мин.

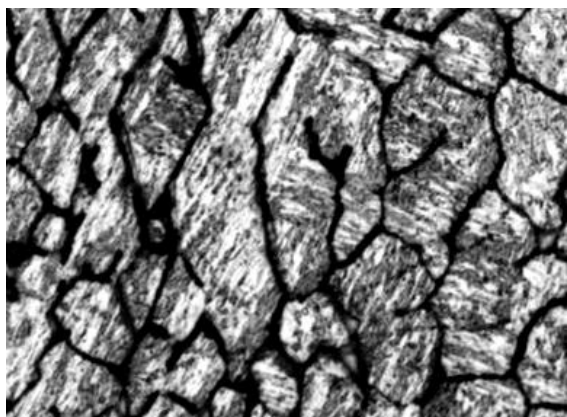
Исследования структуры сварных соединений из стали ВНС-63-Ш показали, что микроструктура сварного шва отличается неоднородностью, в сварном шве зерно гораздо мельче, чем в околошовной зоне, термическая обработка существенно выравнивает структуру, но границы крупных зерен в зоне термического влияния сохраняются. Длительный нагрев при цементации приводит к некоторому росту зерна в середине сварного шва и выявляет границы крупных зерен в зоне термического влияния. Такая структура склонна к трещинообразованию (рис. 1). В связи с этим целесообразно защищать от цементации зону сварного шва гальваническим никелем или медью толщиной от 30 до 60 мкм.

Испытания на стойкость к образованию горячих трещин сварных соединений из стали ВНС-72 в отожженном состоянии показали высокий уровень критической скорости деформации в процессе сварки с присадками:

Присадка	$V_{кр}$, мм/мин
Св-06X13H6M4K8B (ЭК43)	7,2
Св-08X14H7KBM	6,8
Св-09X14H8M2 (ЭП509)	6,2
15X15H4AM (ВНС-72)	6,2.

Ручную аргоно-дуговую сварку стали ВНС-72 осуществляли с промышленными присадочными материалами по различным технологическим вариантам сварки с присадкой из стали ВНС-72:

- послойное охлаждение в процессе сварки, имитирующее перерывы в работе;
- заполнение сварного шва с меньшим количеством слоев (4–5 слоев) и повышенным значением сварочного тока;
- подварка зоны сварного шва после механической разделки до половины высоты шва.



×500

Сварной шов без термической обработки



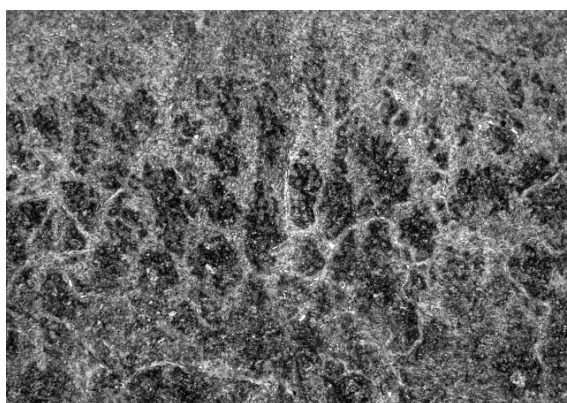
×500

Сварной шов после термической обработки



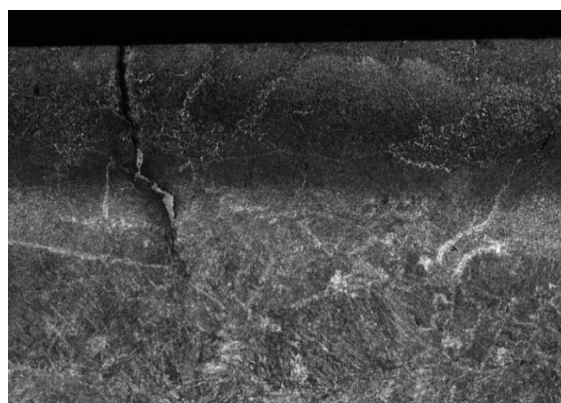
500 мкм

Сердцевина сварного шва после цементации и термической обработки



×500

Цементованный слой сварных образцов



×100

Рис. 1. Микроструктура сварного шва стали ВНС-63-Ш

Сварные образцы термически обрабатывали по режиму основного материала: закалка+обработка холодом+низкий отпуск.

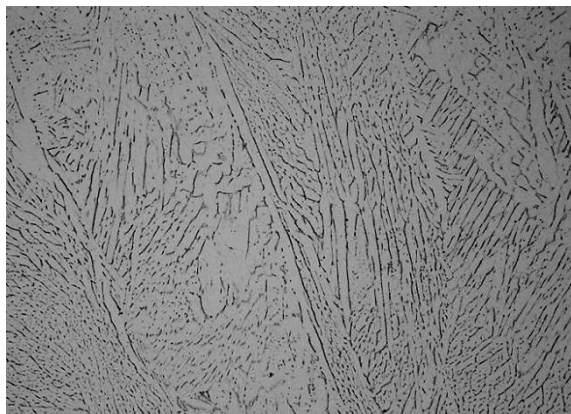
Испытания на растяжение при комнатной температуре сварных образцов из стали ВНС-72, выполненных с промышленными присадками марок 07X14H7KBM, 06X13H6M4K8B (ЭК43) и 09X14H8M2 (ЭП509), показали средние значения кратковременной прочности $\sigma_{в.св}=1135-1289$ МПа ($0,67-0,76\sigma_{в}$). Применение присадки из стали ВНС-72, в том числе с подваркой по шву, позволило получить более высокую прочность сварных соединений – $\sigma_{в.св}=1476-1508$ МПа ($0,87-0,89\sigma_{в}$). При сварке присадкой ВНС-72 с послойным охлаждением прочность снижается на 15%. Местом разрушения образцов при растяжении независимо от присадочного материала являлась зона сварного шва. Разрушенные образцы имели вязкие изломы.

Испытания на ударный изгиб сварных образцов с острым надрезом при комнатной температуре с вышеуказанными присадками показали высокие значения ударной вязкости – $KCV_{шов}^{20^{\circ}}=55-122$ Дж/см². Испытания при температуре -70°C выявили снижение значений ударной вязкости по сравнению со значениями, полученными при $+20^{\circ}\text{C}$ – $KCV_{шов}^{-70^{\circ}}=39-106$ Дж/см². Низкие значения ударной вязкости имеют место при использовании присадки из основного материала – стали ВНС-72. Разрушенные образцы после испытаний на ударный изгиб как при $+20^{\circ}\text{C}$, так и при -70°C имели вязкие изломы с широкими боковыми участками среза.

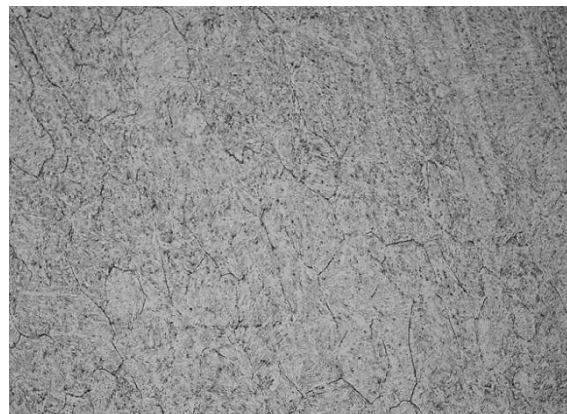
Исследования структуры сварных соединений из стали ВНС-72 показали, что структура сварных швов после сварки без упрочняющей термообработки – аустенито-мартенситная. Количество мартенситной составляющей увеличивается при повышении содержания углерода в присадочном материале (рис. 2). В зоне подварки не выявлены дефекты в виде несплавления, трещин, выделений по границам кристаллитов; структура достаточно однородная, дисперсная. После упрочняющей термообработки структура сварных швов мартенситная с некоторым количеством аустенита. В нижней части сварных швов в состоянии без термической обработки при использовании присадки из стали ВНС-72 наблюдаются выделения карбидов по границам кристаллитов вследствие нагрева нижележащих слоев при сварке последующих. После термической обработки выделения отсутствуют. Структура околошовной зоны сварных швов без термической обработки разнотермическая, без дефектов в виде пор, трещин, оплавления зерен. После упрочняющей термообработки структура околошовной зоны дисперсная, однородная.

Ручную аргоно-дуговую сварку стали ВНС-73-Ш осуществляли в термически упрочненном состоянии с присадочным материалом марки 08X14H7KBM. Исследования механических свойств сварных соединений показали, что среднее значение проч-

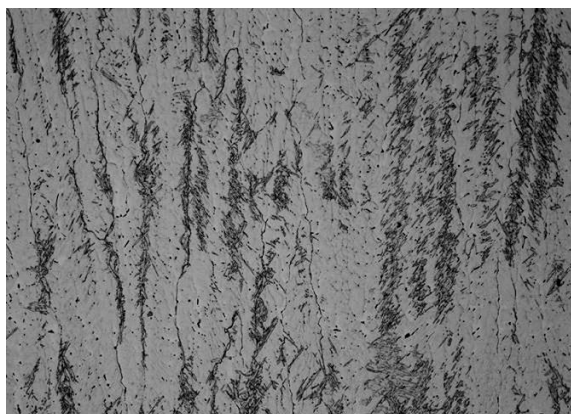
ности сварных соединений без отпуска – $\sigma_{\text{в.св}}^{20^\circ} = 1193$ МПа ($0,8\sigma_{\text{в}}$). Разрушение образцов происходит по сварному шву. Исследования ударной вязкости по зонам сварных соединений показали, что значения показателя максимальны в зоне металла шва ($KCV^{-70^\circ} = 68$ Дж/см²), а в зоне сплавления и в зоне карбидной сетки ударная вязкость в 2 раза ниже, чем в шве ($KCV^{-70^\circ} = 31-35$ Дж/см²). Изломы ударных образцов по зоне шва вязкие с большими участками среза, по зоне сплавления и карбидной сетке изломы менее вязкие, с большой зоной отрыва.



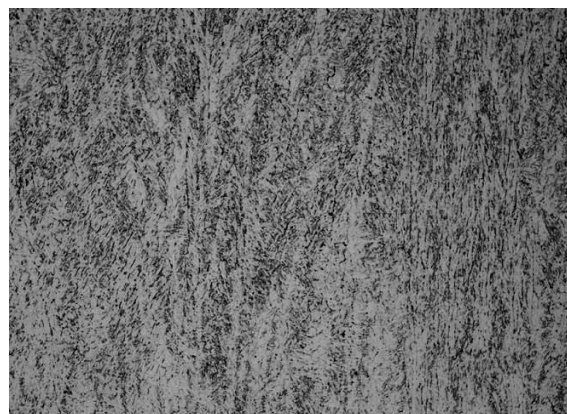
Присадка Sv-06X13N6M4K8B (ЭК43)



Присадка Sv-08X14N7KBM



Присадка Sv-06X14N8M2 (ЭП509)



Присадка ВНС-72

Рис. 2. Микроструктуры ($\times 200$) сварных швов стали ВНС-72 без термической обработки с различными присадками

Проведение отпуска после сварки приводит к снижению уровня прочности до значения $0,78\sigma_{\text{в}}$ и, соответственно, к повышению ударной вязкости шва ($KCV^{-70^\circ} = 83$ Дж/см²) и зоны сплавления ($KCV^{-70^\circ} = 45$ Дж/см²). В зоне выпадения карбидов ударная вязкость не изменяется. Участки среза в изломах ударных образцов по зоне шва и по линии сплавления увеличиваются, по карбидной сетке изломы не изменяются.

Исследования прочности сварных соединений стали ВНС-73-Ш, выполненных электронно-лучевой сваркой, показали более высокий уровень данного показателя (по сравнению с аргоно-дуговой сваркой) как при варианте сварки в термически упрочнен-

ном состоянии ($\sigma_{в.св}^{20^\circ} = 1420\text{--}1423$ МПа, коэффициент ослабления сваркой $K=0,95$ без отпуска после сварки и с отпуском при 200°C), так и при варианте с упрочняющей термической обработкой после сварки ($\sigma_{в.св}^{20^\circ} = 1487$ МПа, $K=0,99$).

Ударная вязкость по всем зонам сварных соединений, выполненных в термически упрочненном состоянии без отпуска после сварки ($KCV^{-70^\circ} = 24\text{--}29$ Дж/см²), равна ударной вязкости сварных соединений с упрочняющей термической обработкой после сварки ($KCV^{-70^\circ} = 27$ Дж/см²).

Отпуск сварных соединений, выполненных в термически упрочненном состоянии, способствует повышению уровня ударной вязкости на ~25% ($KCV^{-70^\circ} = 32\text{--}36$ Дж/см²) – см. таблицу. Преимущественный характер разрушения – отрывом.

Механические свойства* сварных соединений стали ВНС-73-Ш, выполненных ЭЛС

Технологический вариант	$\sigma_{в.св}^{20^\circ}$, МПа	K^{**}	Ударная вязкость KCV^{-70° , Дж/см ²		
			в шве	в зоне сплавления	в карбидной сетке
Сварка с последующей упрочняющей термообработкой	<u>1480–1490</u> 1487	0,99	<u>20–34</u> 27	–	–
Сварка стали в термически упрочненном состоянии:					
– без отпуска после сварки	<u>1420–1430</u> 1423	0,95	<u>25–29</u> 27	<u>21–25</u> 24	<u>24–32</u> 29
– с отпуском после сварки	<u>1410–1430</u> 1420	0,95	<u>31–39</u> 35	<u>31–43</u> 36	<u>32–33</u> 32

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

** Коэффициент ослабления сваркой $K = \sigma_{в.св} / \sigma_{в}$ ($\sigma_{в} = 1500$ МПа).

Исследовали структуру сварных соединений высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-73-Ш, выполненных:

- электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) в термически упрочненном состоянии без последующей термической обработки;
- электронно-лучевой сваркой с последующей термической обработкой;
- ручной аргоно-дуговой сваркой (АрДЭС) в термически упрочненном состоянии с присадкой 08X14N7KBM без последующей термической обработки.

Дефекты в виде пор, трещин, несплавлений и т. д. не обнаружены.

Согласно структурной диаграмме Шеффлера структура сварных швов – аустенито-мартенситная. В зависимости от метода сварки и термической обработки количество мартенсита и аустенита может быть различным. Наибольшее количество мартенсита имеет место при ЭЛС стали с последующей термической обработкой, меньшее – при ЭЛС в термически упрочненном состоянии, наименьшее – при АрДЭС стали в термически упрочненном состоянии с присадкой 08X14N7KBM.

Микроструктура сварных швов, выполненных ЭЛС, – дисперсная, боковые дендриты смыкаются в центре (рис. 3, а). Структура сварного шва, выполненного АрДЭС, – более крупная, наблюдается прорастание кристаллитов через слои кристаллизации (рис. 3, б).

Зона термического влияния хромоникелевых сталей при сварке без последующей термической обработки имеет сложное строение. Участки, примыкающие к сварному шву, нагреваемые от температуры плавления до 1100°C, находятся в аустенито-мартенситном состоянии, при котором возможно растворение или коагуляция карбидов, что может привести к разупрочнению соединения. Имеется зона с оплавленными зернами как при аргоно-дуговой, так и при электронно-лучевой сварке, что может вызвать охрупчивание этого участка (рис. 3, в, г).

При более низких температурах нагрева происходит образование карбидов в виде сетки по всей толщине сварного соединения на некотором расстоянии от линии сплавления, что может повысить твердость металла в этой зоне (рис. 1, д).

Термическая обработка выравнивает структуру по зонам сварного соединения, оплавленные зерна на линии сплавления и карбидная сетка в околошовной зоне отсутствуют.

Исследовали распределение микротвердости по зонам сварных соединений стали ВНС-73-Ш, выполненных АрДЭС. Установлено, что значения твердости металла шва при сварке термически упрочненной стали без последующей термообработки методом АрДЭС составляет 390–395 НВ, при ЭЛС: 420 НВ. Структура указанных зон – аустенито-мартенситная с различным соотношением аустенита и мартенсита. Наиболее высокие значения твердости металла шва, равные твердости основного металла (450–480 НВ), соответствуют значениям для сварных соединений, выполненных ЭЛС с последующей упрочняющей термической обработкой, выравнивающей структуру всех зон соединения; структура – аустенито-мартенситная.

Зоны термического влияния сварных соединений, выполненных в термически упрочненном состоянии, имеют некоторые повышенные и пониженные значения твердости, соответствующие структурным изменениям при сварочном нагреве основного материала. В околошовной зоне на расстоянии 3–5 мм от линии сплавления наблюдается повышение твердости вследствие образования мартенситной структуры с выделениями карбидов по границам зерен. Далее твердость изменяется до уровня основного металла (450–470 НВ). Отпуск при температуре 200°C сварных соединений, выполненных на термоупрочненной стали, обуславливает некоторое снижение твердости.

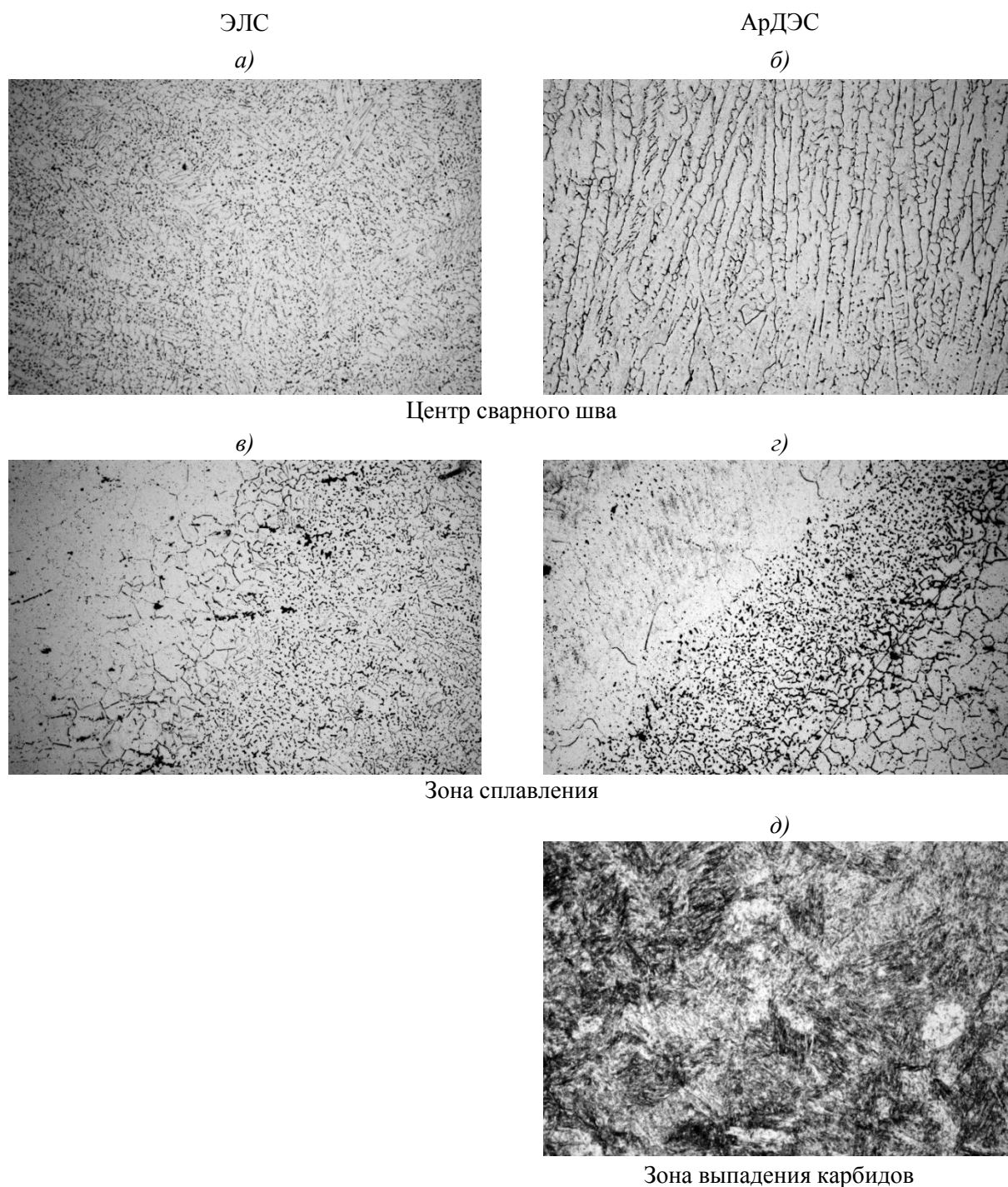


Рис. 3. Микроструктура (а-г – $\times 200$; д – $\times 500$) зон сварного соединения стали ВНС-73-Ш, выполненного в термически упрочненном состоянии без последующей термической обработки

Заключения

1. Проведены исследования партии сварных образцов из стали ВНС-63-Ш. Получены следующие механические свойства сварных соединений:

$$- \sigma_{\text{в.св}}^{20^\circ} = 1505 \text{ МПа} (\sigma_{\text{в.св}}^{20^\circ} = 0,96 \sigma_{\text{в}}^{20^\circ}), KCU_{\text{в.св}}^{20^\circ} = 320 \text{ Дж/см}^2;$$

$$- \sigma_{\text{в.св}}^{300^\circ} = 1225 \text{ МПа} (\sigma_{\text{в.св}}^{300^\circ} = 0,9 \sigma_{\text{в}}^{300^\circ});$$

$$- \sigma_{\text{в.св}}^{-55^\circ} = 1595 \text{ МПа} (\sigma_{\text{в.св}}^{-55^\circ} = 0,99 \sigma_{\text{в}}^{-55^\circ}), KCU_{\text{в.св}}^{-55^\circ} = 137 \text{ Дж/см}^2.$$

По результатам испытания на МнЦУ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов определены средние значения пределов выносливости сварных образцов при различных температурах $\sigma_{-1}^{20^\circ} = 500$ МПа, $\sigma_{-1}^{300^\circ} = 400$ МПа (сварка+термообработка), $\sigma_{-1}^{300^\circ} = 440$ МПа (сварка+термообработка+цементация).

2. Исследования структуры сварных соединений из стали ВНС-63-Ш показали, что микроструктура сварного шва отличается неоднородностью, в сварном шве зерно гораздо мельче, чем в околошовной зоне, термическая обработка существенно выравнивает структуру, но границы крупных зерен в зоне термического влияния сохраняются.

3. Длительный нагрев при цементации приводит к некоторому росту зерна в сердцевине сварного шва и выявляет границы крупных зерен в зоне термического влияния. Такая структура склонна к трещинообразованию. В связи с этим целесообразно защищать от цементации зону сварного шва гальваническим никелем или медью толщиной от 30 до 60 мкм.

4. Аргано-дуговая сварка с промышленными сварочными проволоками с содержанием углерода 0,06–0,09% позволяет получить сварные соединения с прочностью $(0,67–0,76)\sigma_{\text{в}}$.

5. Аргано-дуговая сварка с присадкой из стали ВНС-72 позволяет получить сварные соединения с прочностью $(0,82–0,89)\sigma_{\text{в}}^{20^\circ}$, в том числе с подваркой по зоне шва, с удовлетворительной ударной вязкостью и высокой коррозионной стойкостью.

6. Исследования механических свойств сварных соединений стали ВНС-73-Ш показали, что среднее значение прочности сварных соединений без отпуска – $\sigma_{\text{в.св}}^{20^\circ} = 1193$ МПа $(0,8\sigma_{\text{в}})$. Разрушение образцов происходит по сварному шву. Исследования ударной вязкости по зонам сварных соединений показали, что значения показателя максимальны в зоне металла шва ($KCV^{-70^\circ} = 68 \text{ Дж/см}^2$), а в зоне сплавления и в зоне карбидной сетки ударная вязкость в 2 раза ниже, чем в шве ($KCV^{-70^\circ} = 31–35 \text{ Дж/см}^2$), отпуск после сварки приводит к снижению уровня прочности до значения $0,78\sigma_{\text{в}}$ и, соответственно – к повышению ударной вязкости шва ($KCV^{-70^\circ} = 83 \text{ Дж/см}^2$) и зоны сплавления ($KCV^{-70^\circ} = 45 \text{ Дж/см}^2$). В зоне выпадения карбидов ударная вязкость не изменяется. Участки среза в изломах ударных образцов по зоне шва и по линии сплавления увеличиваются, по карбидной сетке изломы не изменяются.

7. Исследования прочности сварных соединений стали ВНС-73-Ш, выполненных электронно-лучевой сваркой, показали более высокий уровень данного показателя по сравнению с аргоно-дуговой сваркой как при варианте сварки в термически упрочненном состоянии ($\sigma_{в.св}^{20^\circ} = 1420\text{--}1423$ МПа, $K=0,95$ без отпуска после сварки и с отпуском 200°C), так и при варианте с упрочняющей термической обработкой после сварки ($\sigma_{в.св}^{20^\circ} = 1487$ МПа, $K=0,99$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Плешанов В.С. и др. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 //Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. №2. С. 85–96.
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
5. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф. Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионностойкой стали переходного класса с повышенным содержанием азота //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 31–36.
6. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Громов В.И. Развитие механизмов водородной и бейнитной хрупкости конструкционной стали в процессе эксплуатации крупногабаритных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 88–93.
7. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М. Перспективные высокопрочные коррозионностойкие стали, легированные азотом (сравнительный анализ) //Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 27–32.
8. Лукин В.И., Банас И.П., Ковальчук В.Г., Голев Е.В. Аргоно-дуговая сварка высокопрочной цементуемой стали ВНС-63 //Труды ВИАМ. 2013. №8. Ст. 01 (viam-works.ru).
9. Жуков А.А., Навоев А.П. Определение модуля упругости цементованного слоя //Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. №5. С. 37–40.
10. Тарасенко Л.В., Пахомова С.А., Унчикова М.В., Герасимов С.А. Материаловедение. М.: ИНФРА-М. 2012. 474 с.
11. Лукин В.И., Вознесенская Н.М., Ковальчук В.Г. и др. Сварка высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-72 //Сварочное производство. 2012. №10. С. 31–35.

12. Подшипниковая сталь: пат. №2452790 Рос. Федерация; заявл.16.06.2012; опубл.10.06.2012.
13. Матюнин В.М. Металловедение в теплоэнергетике: Учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ. 2008. 328 с.
14. Лашенко Г.И. Тенденция развития технологий сварочного производства //Сварщик. 2011. №6. С. 6–11.
15. Миддельдорф К., Хофе Фон Д. Тенденции развития технологий соединения материалов //Автоматическая сварка. 2008. №11. С. 37–48.
16. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „САТУРН”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. С. 10–15.
3. Panin V.E., Kablov E.N., Pleshanov V.S. i dr. Vlijanie ul'trazvukovoj udarnoj obrabotki na strukturu i soprotivlenie ustalosti svarnyh soedinenij vysokoprochnoj stali VKS-12 [Influence of ultrasonic shock processing on structure and resistance of fatigue of welded compounds of VKS-12 high-strength steel] //Fizicheskaja mezomehanika. 2006. T. 9. №2. С. 85–96.
4. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij ukklad [Sixth technological way] //Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
5. Tonysheva O.A., Voznesenskaja N.M., Shal'kevich A.B., Petrakov A.F. Issledovanie vlijanija vysokotemperaturnoj termomehanicheskoj obrabotki na strukturu, tehnologicheskie, mehanicheskie i korrozionnye svojstva vysokoprochnoj korrozionnostojkoj stali perehodnogo klassa s povyshennym sodержaniem azota [Research of influence of high-temperature thermomechanical processing on structure, technological, mechanical and corrosion properties of high-strength corrosion-resistant steel of transitional class with the raised content of nitrogen] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 31–36.
6. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Gromov V.I. Razvitie mehanizmov vodorodnoj i bejnitnoj hрупкости konstrukcionnoj stali v processe jekspluatacii krupnogabaritnyh konstrukcij [Development of mechanisms of hydrogen and bainitic embrittlement of structural steel in use large-size designs] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 88–93.
7. Tonysheva O.A., Voznesenskaja N.M. Perspektivnye vysokoprochnye korrozionnostojkie stali, legirovannye azotom (sravnitel'nyj analiz) [Perspective high-strength corrosion-resistant became, legirovannye azotom (sravnitel'nyj analiz)]

- alloyed by nitrogen (the comparative analysis)] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №3. S. 27–32.
8. Lukin V.I., Banas I.P., Koval'chuk V.G., Golev E.V. Argono-dugovaja svarka vysokoprochnoj cementuemoj stali VNS-63 [Argon-arc welding of high-strength VNS-63 tsementuyemy steel] //Trudy VIAM. 2013. №8. St. 01 (viam-works.ru).
 9. Zhukov A.A., Navoev A.P. Opredelenie modulja uprugosti cementovannogo sloja [Definition of elastic modulus of tsementovanny layer] //Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. 2012. №5. S. 37–40.
 10. Tarasenko L.V., Pahomova S.A., Unchikova M.V., Gerasimov S.A. Materialovedenie [Materials science]. M.: INFRA-M. 2012. 474 s.
 11. Lukin V.I., Voznesenskaja N.M., Koval'chuk V.G. i dr. Svarka vysokoprochnoj korroziionno-stojkoj stali VNS-72 [Welding of high-strength VNS-72 anticorrosion steel] //Svarochnoe proizvodstvo. 2012. №10. S. 31–35.
 12. Podshipnikovaja stal' [Bearing steel]: pat. №2452790 Ros. Federacija; zajavl.16.06.2012; opubl.10.06.2012.
 13. Matjunin V.M. Metallovedenie v teplojenergetike [Metallurgical science in heat-and-power engineering]: Uchebnoe posobie. M.: Izdatel'skij dom MJeI. 2008. 328 s.
 14. Lashhenko G.I. Tendencija razvitija tehnologij svarochnogo proizvodstva [Tendency of development of technologies of welding production] //Svarshhik. 2011. №6. S. 6–11.
 15. Middel'dorf K., Hofe Fon D. Tendencii razvitija tehnologij soedinenija materialov [Tendencies of development of technologies of connection of materials] //Avtomaticeskaja svarka. 2008. №11. S. 37–48.
 16. Shmotin Ju.N., Starkov R.Ju., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Novye materialy dlja perspektivnogo dvigatelja OAO «NPO „SATURN”» [New materials for the perspective engine of JSC «NPO „Saturn”»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 6–8.