

УДК 621.791.725:669.

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 14ХГН2МДАФБ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

МАРКАШОВА Л. И.¹ *д.т.н., проф.*,
ПОЗНЯКОВ В.Д.¹ *чл.-кор. НАН Украины*,
ШЕЛЯГИН В. Д.¹, *к.т.н.*,
БЕРДНИКОВА Е. Н.¹, *к.т.н.*,
БЕРНАЦКИЙ А. В.¹, *к.т.н.*
АЛЕКСЕЕНКО Т.А.¹, *к.т.н.*
ПОЛОВЕЦКИЙ Е.В.¹, *к.т.н.*

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-21-61, e-mail: office@paton.kiev.ua ORCID ID: 0000-0066-0317-7332

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 200-73-66, e-mail: paton39@ukr.net, ORCID ID: 0000-0066-0256-0493

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: omberdnikova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9754-9478

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 200-65-66, e-mail: laser-77@online.ua, ORCID ID: 0000-0078-0167-4115

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-21-77, e-mail: avb77@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-8050-5580

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: alexeenko_tetyana@ukr.net, ORCID ID: 0000-0065-0592-7937

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: poloveckiy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8113-0434

Аннотация. *Цель.* В настоящее время при изготовлении сварных конструкций ответственного назначения получили прогрессивные технологии лазерной сварки, которые позволяют получать качественные сварные соединения с использованием высоких скоростей сварки в диапазоне скоростей охлаждения 30...100°C/с, что значительно (более чем в два раза по сравнению с дуговой сваркой) повышает производительность процесса и обеспечивает повышение показателей механических свойств сварных соединений. Целью настоящей работы было исследование особенностей фазовых и структурных изменений в металле сварных соединений высокопрочной стали, полученных лазерной сваркой и оценке влияния технологических параметров лазерной сварки на формирующуюся структуру и механические свойства сварных соединений. *Методика.* Исследования выполнялись на сварных соединениях высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ. Сварные соединения получали в условиях различных скоростей (18...50 м/ч) лазерной сварки с применением технологического СО₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм (диаметр фокального пятна 0,4 мм) без использования присадочных материалов. Во всех случаях мощность лазерного излучения составляла 4,4 кВт в смеси защитных газов (18% СО₂ + 82% Ar). Структурно-фазовые изменения в металле швов и зонах термического влияния изучали методами оптической металлографии (микроскопы Versamet-2, Neophot-32) и аналитической растровой электронной микроскопии (сканирующий микроскоп SEM-515 фирмы PHILIPS, Нидерланды). *Результаты.* На основе экспериментальных данных, полученных на различных структурных уровнях, выполнены аналитические оценки влияния конкретных структурных параметров (фазового состава, зеренной и субзеренной структур) на механические свойства сварных соединений в зависимости от режимов лазерной сварки. *Научная новизна.* Определены технологические режимы лазерной сварки высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ, которые обеспечивают оптимальную структуру и фазовый состав и тем самым высокие показатели механических свойств сварных соединений. *Практическая значимость.* Полученные результаты показали перспективность применения технологических режимов лазерной сварки, при которых обеспечивается необходимый комплекс механических свойств сварных соединений путем формирования наиболее благоприятной структуры металла шва и зоны термического влияния.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, лазерная сварка, сварные соединения, механические свойства, структура металла, фазовый состав, структурные параметры, упрочнение.

СТРУКТУРА ТА МЕХАНИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ ЗЄДНАНЬ СТАЛІ 14ХГН2МДАФБ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ

МАРКАШОВА Л. І.¹ *д.т.н., проф.*,
ПОЗНЯКОВ В.Д.¹ *чл.-кор. НАН України*,

БЕРДНІКОВА О. М.¹, *к.т.н.*,
ШЕЛЯГІН В. Д.¹, *к.т.н.*,
БЕРНАЦЬКИЙ А. В.¹, *к.т.н.*
АЛЕКСЕЄНКО Т. О.¹, *к.т.н.*
ПОЛОВЕЦЬКИЙ Е. В.¹, *к.т.н.*

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-21-61, e-mail: office@paton.kiev.ua, ORCID ID: 0000-0066-0317-7332

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 200-73-66, e-mail: paton39@ukr.net, ORCID ID: 0000-0066-0256-0493

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: omberdnikova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9754-9478

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 200-65-66, e-mail: laser-77@online.ua, ORCID ID: 0000-0078-0167-4115

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-21-77, e-mail: avb77@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-8050-5580

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: alexeenko_tetyana@ukr.net, ORCID ID: 0000-0065-0592-7937

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-25-63, e-mail: poloveckiy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8113-0434

Анотація. Мета. В теперішній час при виготовленні зварних конструкцій відповідального призначення отримали прогресивні технології лазерного зварювання, які дозволяють отримувати якісні зварні з'єднання з використанням високих швидкостей зварювання в діапазоні швидкостей охолодження 30...100°C/с, що значно (більш ніж у два рази в порівнянні з дуговим зварюванням) підвищує продуктивність процесу та забезпечує підвищення показників механічних властивостей зварних з'єднань. Метою цієї роботи було дослідження особливостей фазових та структурних змін в металі високоміцної сталі, що були отримані лазерним зварюванням та оцінка впливу технологічних параметрів лазерного зварювання на структуру, що формується, та механічні властивості зварних з'єднань. **Методика.** Дослідження виконувались на зварних з'єднаннях високоміцної сталі 14ХГН2МДАФБ. Зварні з'єднання отримали в умовах різних швидкостей (18...50 м/г) лазерним зварюванням зі застосуванням технологічного СО₂-лазера з довжиною хвилі 10,6 мкм (діаметр фокальної плями 0,4 мм) без використання присадних матеріалів. У всіх випадках потужність лазерного випромінювання складала 4,4 кВт у суміші захисних газів (18% СО₂ + 82% Аг). Структурно-фазові зміни у металі швів та зонах термічного впливу вивчали методами оптичної металографії (мікроскопи Versamet-2, Neophot-32) та аналітичної растрової електронної мікроскопії (скануючий мікроскоп SEM-515 фірми PHILIPS, Нідерланди). **Результати.** На основі експериментальних даних, отриманих на різних структурних рівнях, виконані аналітичні оцінки впливу конкретних структурних параметрів (фазового складу, зеленої та субзернової структури) на механічні властивості зварних з'єднань в залежності від режимів лазерного зварювання. **Наукова новизна.** Визначено технологічні режими лазерного зварювання високоміцної сталі 14ХГН2МДАФБ, що забезпечують оптимальну структуру та фазовий склад та тим самим високі показники механічних властивостей зварних з'єднань. **Практичне значення.** Отримані результати показали перспективність застосування технологічних режимів лазерного зварювання, при котрих забезпечується необхідний комплекс механічних властивостей зварних з'єднань шляхом формування найбільш сприятливої структури металу швів та зонах термічного впливу.

Ключові слова: високоміцна сталь, лазерне зварювання, зварні з'єднання, механічні властивості, структура металу, фазовий склад, структурні параметри, зміцнення.

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF 14KhGN2MDAFB STEELS AT THE LASER - WELDING

MARKASHOVA L. I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
POZNYAKOV V. D.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Corr. Member of the NAS of Ukraine*,
BERDNIKOVA O. M.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
SHELYAGIN V. D.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
BERNATSKIY A.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
ALEKSEENKO T.A.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
POLOVETSKYI I.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*.

¹ Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-21-61, e-mail: office@paton.kiev.ua, ORCID ID: 0000-0066-0317-7332

¹ Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 200-73-66, e-mail: paton39@ukr.net, ORCID ID: 0000-0066-0256-0493

¹ Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-25-63, e-mail: omberdnikova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9754-9478

¹ Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 200-65-66, e-mail: laser-77@online.ua, ORCID ID: 0000-0078-0167-4115

¹ Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-21-77, e-mail: avb77@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-8050-5580

¹ Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-25-63, e-mail: alexeenko_tetyana@ukr.net, ORCID ID: 0000-0065-0592-7937

¹ Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimira Malevicha str, 11, 03650, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 205-25-63, e-mail: poloveckiy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8113-0434

Annotation. Purpose.

Nowadays, in the manufacture of welded structures of a responsible design, progressive laser welding technologies, which allow obtaining high-quality welded joints by using high welding speeds in the cooling speed range of 30...100°C/s, have been obtained. This significantly increases (more than doubled compared with arc welding) the productivity of the welding process and provides an improvement in the mechanical properties of welded joints. The purpose of this work was to study the features of phase and structural changes in the metal of welded joints of high-strength steel obtained by laser welding and to estimate the effect of laser welding technological parameters on the formed structure and mechanical properties of welded joints. **Techniques.** The investigations were carried out on welded joints of high-strength 14KhGN2MDAFB steel. Welded joints were obtained at different speeds (18...50 m/h) of laser welding using a technological CO₂-laser with a wavelength of 10.6 μm (focal spot diameter 0.4 mm) without the use of filler materials. Structural-phase and concentration changes in chemical elements in the weld metal and in the heat-affected zone were studied by methods of optical metallography (microscopes Versamet-2, Neophot-32) and analytical scanning electron microscopy (scanning electron microscope SEM-515 from PHILIPS, The Netherlands). **Results.** Based on obtained experimental data on different structural levels, analytical estimates were made that show the influence of specific structural parameters (phase composition, grain and subgrain structures) on the mechanical properties of welded joints depending on the laser welding regimes. **Scientific novelty.** Technological regimes of laser welding of high-strength 14KhGN2MDAFB steel have been determined, which provide the optimal structure and phase composition and thus high indicators of mechanical properties of welded joints. **Practical significance.** The obtained results showed the prospects of using technological modes of laser welding, which provide the necessary complex of mechanical properties of welded joints by forming the most favorable structure of the weld metal and the heat affected zone.

Keywords: high-strength steel, the laser-welding, welded joints, mechanical properties, metal structure, phase composition, structural parameters, hardening.

Введение

При изготовлении ответственных сварных конструкций длительной эксплуатации особое значение приобретают высокопрочные стали, обеспечивающие в сложных эксплуатационных условиях требуемый уровень механических свойств. В настоящее время при изготовлении таких конструкций получили прогрессивные технологии лазерной сварки, которые позволяют получать качественные сварные соединения с использованием высоких скоростей сварки в диапазоне скоростей охлаждения 30...100°C/с, что значительно (более чем в два раза по сравнению с дуговой сваркой) повышает производительность процесса и обеспечивает повышение показателей механических свойств сварных соединений [1 - 4]. При этом параметры швов и зоны термического влияния сварных соединений при лазерной сварке по сравнению с дуговой уменьшаются в несколько раз. Однако в процессе изготовления сварных соединений из сталей такого типа в результате воздействия термического цикла сварки структура и фазовый состав металла швов и зоны термического влияния (ЗТВ) могут существенно меняться и, соответственно, влиять на уровень механических свойств и трещиностойкость сварных соединений [5].

Цель

Целью настоящей работы было исследование особенностей фазовых и структурных изменений в металле сварных соединений высокопрочной стали, полученных лазерной сваркой и оценке влияния технологических параметров лазерной сварки на формирующуюся структуру и механические свойства сварных соединений.

Материал

Работу выполняли на образцах высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ (0,183% С; 1,19% Cr; 0,98% Mn; 2,07% Ni; 0,22% Mo 0,08% V; 0,33% Si; не более 0,018% Р и 0,005% S) толщиной до 10 мм без использования присадочных материалов.

Методика и результаты

Исследования выполнялись на сварных соединениях высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ. Сварные соединения получали в условиях различных скоростей ($V_{св} = 18; 30; 50$ м/ч) лазерной сварки и соответственно скоростей охлаждения ($W_{6/5} = 28; 50; 103$ °C/с). Применяли технологический CO₂-лазер с длиной волны 10,6 мкм (диаметр фокального пятна 0,4 мм) без использования присадочных материалов. Во всех случаях мощность лазерного излучения составляла 4,4 кВт в смеси защитных газов (18% CO₂

+ 82% Ag). Структурно-фазовые изменения в металле швов и зонах термического влияния изучали методами оптической металлографии (микроскопы Versamet-2, Neophot-32) и аналитической растровой электронной микроскопии (сканирующий микроскоп SEM-515 фирмы PHILIPS, Нидерланды).

По результатам механических испытаний было установлено, что временное сопротивление и предел текучести для исследуемых режимов лазерной сварки примерно на одном уровне, табл.1. Результаты испытаний сварных соединений на ударный изгиб, показали, что при $V_{св} = 50$ м/ч сварные соединения отличаются повышением (в 1,4...1,6 раза) ударной вязкости и хладостойкости.

Таблица 1

Механические свойства сварных соединений / Mechanical properties of welded joints

$V_{св}$, м/ч	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	ψ	КCV, Дж/см ² при T, °C	
					+20	-40
18	843,4	929,4	15,3	59,9	34	15
	830,9	928,6	16,7	55,3		
	832,3	922,5	14,0	59,9		
	835,5	926,8	15,3	58,4		
30	860,1	922,5	12,3	64,0	55,3	10,3
	855,6	924,1	10,1	64,6		
	860,1	929,4	11,2	64,0		
	858,6	925,3	11,2	64,2		
50	862,5	924,1	14,0	60,4	45,6	24,1
	862,5	924,1	14,0	60,4		
	862,5	924,1	14,7	60,4		
	862,5	924,1	14,2	60,4		

Таблица 2

Результаты исследования структуры металла швов и участка перегрева ЗТВ / Results of investigations of structure of the metal of welds and the overheating area of HAZ

Участок	D_3 , мкм	h_p , мкм	$\lambda_{ч}$, мкм
$V_{св} \sim 18$ м/ч			
Шов	50/90×150/410	0,5...0,8	0,3...0,7
ЗТВ	50/90	0,25...0,6	0,13...0,4
$V_{св} \sim 30$ м/ч			
Шов	30/100×120/400	0,3...0,5	0,1...0,3
ЗТВ	30/80	0,2...0,4	0,08...0,2
$V_{св} \sim 50$ м/ч			
Шов	40/20×100/400	0,2...0,4	0,08...0,3
ЗТВ	30/60	0,2...0,3	0,07...0,2

В результате исследования структурно-фазовых составляющих: бейнита; мартенсита; феррита; размеров зерен (D_3 , табл. 2); коэффициента их формы ($\alpha = l/h$), формирующихся в металле швов и различных участках ЗТВ, а также соответствующих

изменений микротвердости (HV) установлено следующее.

Структура основного металла стали 14ХГН2МДАФБ бейнито-ферритная с размером зерен $D_3 = 5...24$ мкм и микротвердостью HV = 2740...2850МПа.

При минимальной скорости $V_{св} = 18$ м/ч лазерной сварки структура металла шва бейнитная с $D_3 \sim 40...80 \times 150...400$ мкм и $\alpha \sim 3...7$ (HV = 2850...3510 МПа), рис 1 а. При переходе от шва к ЗТВ изменяется фазовый состав металла от бейнитного до бейнитно- мартенситного при уменьшении размера зерен в 3...4 раза и повышении HV на 17%, рис 1 б.

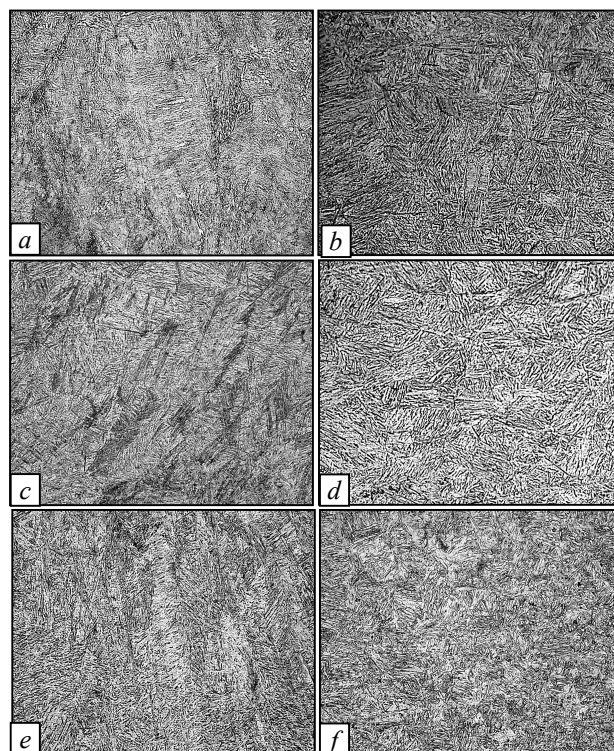


Рис. 1. Микроструктура металла (x500) швов (a, c, e) и участка перегрева ЗТВ (b, d, f) при лазерной сварке: $V_{св} \sim 18$ м/ч (a, b); 30 м/ч (c, d) и 50 м/ч (e, f); / The microstructure of the metal (x500) of welds (a, c, e) and the overheating area of HAZ (b, d, f) laser welding: $V_{св} \sim 18$ м / h (a, b); 30 м / h (c, d) and 72 м / h (e, f)

В случае $V_{св} = 30$ м/ч металл швов сварных соединений имеет бейнитную структуру (HV = 3450...4010 МПа) с $\alpha \sim 3...5$, рис 1 c. Металлу швов сварных соединений характерны градиенты (в 1,2 раза) по микротвердости, что обусловлено формированием структур бейнита верхнего. При переходе от шва к ЗТВ фазовый состав металла изменяется от бейнитного до бейнитно-мартенситного, микротвердость в среднем увеличивается на 12% при измельчении зеренной структуры в 3...4 раза, рис 1 d.

В случае использования максимальных скоростей сварки $V = 50$ м/ч фазовый состав швов бейнито – мартенситный (HV = 3870...4250 МПа) при коэффициенте формы зерен $\alpha \sim 2...3$ и отсутствии

градиентов по микротвердости, рис 1 е. Фазовый состав металла шва и участка перегрева одинаковый (бейнитно – мартенситный) при формировании в основном структур бейнита нижнего и измельчении зерна в ~ 3 раза, рис 1 ф.

Анализ исследований концентрационных изменений, прежде всего, основных химических элементов (хрома, никеля, марганца), во всех исследуемых сварных соединениях показал, что градиенты по содержанию этих элементов не превышают 0,4 масс. %.

Результаты детальных исследований на растровом электронном микроскопе характера формирующейся субструктуры во внутренних объемах зерен в различных структурных составляющих показали следующее.

Так, в металле шва и участке перегрева при $V_{св} = 18$ м/ч ширина реек (h_p) бейнитных структур составляет 0,5...0,8 мкм (в шве) и 0,25...0,6 мкм (в ЗТВ) соответственно, рис.2 а, б. С увеличением скорости сварки до 50 м/ч в металле шва и в участке перегрева металла ЗТВ структура имеет более дисперсное строение, уменьшается h_p бейнитных структур до 0,3...0,5 мкм (в шве) и 0,13...0,4 мкм (в ЗТВ), рис.2 с, d. Кроме того, формируется отпущенный мартенсит.

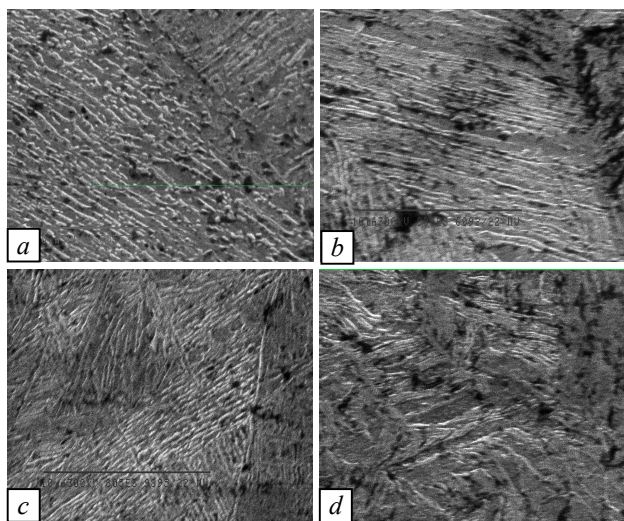


Рис.2. Растровые изображения бейнитной структуры ($\times 8050$) металла швов (а, с) и участка перегрева ЗТВ (b, d) при лазерной сварке: $V_{св} \sim 18$ м/ч (а, b) и 50 м/ч (с, d); / Raster images of a bainite structure ($\times 8050$) of the metal of welds (a, c) and the overheating area of HAZ (b, d) laser welding: $V_{св} \sim 18$ m / h (a, b) and 50 m / h (c, d)

Таким образом, сопоставление структуры и фазового состава металла швов в исследованных сварных соединениях показало, что при увеличении скорости сварки от $V_{св} = 18$ м/ч до $V_{св} = 50$ м/ч изменяется фазовый состав металла шва от бейнитного до бейнитно-мартенситного, на 25% увеличивается микротвердость, формируется более равноосная зеренная структура при измельчении зерна на 15% и уменьшении коэффициента формы

зерна α от $\sim 3...7$ до $\sim 2...3$, уменьшается ширина реек бейнитных структур в 2 раза, рис.5а. В участке перегрева ЗТВ для всех скоростей сварки фазовый состав металла бейнитно-мартенситный, микротвердость приблизительно одинаковая при уменьшении размера зерна и субзерна в 1,5 раза, рис.5 б.

В итоге установлено, что наиболее оптимальная структура исследуемых сварных соединений (с точки зрения равномерного измельчения структурных параметров, отсутствия градиентов по зеренной структуре и микротвердости) формируется при увеличении от $V_{св} = 18$ м/ч скорости сварки до $V_{св} = 50$ м/ч, что должно обеспечивать равномерный уровень механических свойств и трещиностойкость сварных соединений.

Экспериментальная база данных с использованием разработанного экспериментально - аналитического подхода по оценке дифференцированного вклада параметров структуры на механические характеристики сварных соединений высокопрочных сталей, позволила провести прогнозирование свойств прочности сварных соединений по известным зависимостям Холла - Петча, Орована и др. [5 - 7]. На данном этапе исходные данные для количественной оценки прочности металла – это экспериментальные данные, полученные только при помощи оптической и растровой электронной микроскопии: D_3 - размер зерен; h_p – ширина реек бейнитной структуры; $\lambda_{ч}$ – эффективные расстояния между карбидными фазами, т.е. без учета параметров тонкой структуры (плотности дислокаций), табл. 1.

Сопоставлением упрочняющего влияния формирующихся структур в металле сварных соединений стали 14ХГН2МДАФБ при переходе $V_{св} = 18$ м/ч $\rightarrow 30$ м/ч $\rightarrow 50$ м/ч, а именно величины зерна, ширины реек бейнитных структур, частиц фазовых выделений установлено, что при увеличении скорости лазерной сварки возрастает упрочняющее влияние структуры, что связано с увеличением вклада субструктурного ($\Delta\sigma_c \sim$ в 1,8 раза), дисперсионного ($\Delta\sigma_{д.у.} \sim$ в 2 раза) и зернограничного ($\Delta\sigma_3 \sim$ в 1,2 раза) упрочнений за счет диспергирования структурных составляющих, табл. 3.

Таким образом, методики количественной оценки свойств прочности металла по конкретным структурным параметрам позволяют прогнозировать качество сварных соединений при формировании в зоне сварки структур различного типа и выявлять структурные факторы, оказывающие основное влияние на изменение механических свойств.

Результаты

На основе информации, полученной на различных структурных уровнях (от зеренного до дислокационного), выполнены аналитические оценки влияния структурных параметров (фазового состава,

зеренной, субзеренной структур) на механические свойства в зависимости от режимов лазерной сварки/

Таблица 3

Расчетные значения основных составляющих структурного (зеренного, субструктурного, дисперсионного) упрочнения / The calculated values of the main components of the structural (grain, sub-structural, dispersion) hardening

Исследуемый участок Упрочнение	Шов	I зона ЗТВ
$V_{св} \sim 18$ м/ч		
$\Delta\sigma_z$, МПа	55	75
$\Delta\sigma_c$, МПа	187...300	214...600
$\Delta\sigma_{д.у.}$, МПа	37...75	60...152
$\sum\Delta\sigma_{(з, с, д.у.)}$, МПа	376	588
$V_{св} \sim 30$ м/ч		
$\Delta\sigma_z$, МПа	57	90
$\Delta\sigma_c$, МПа	300...500	375...750
$\Delta\sigma_{д.у.}$, МПа	76...188	106...225
$\sum\Delta\sigma_{(з, с, д.у.)}$, МПа	589	820
$V_{св} \sim 50$ м/ч		
$\Delta\sigma_z$, МПа	60	100
$\Delta\sigma_c$, МПа	375...750	500...750
$\Delta\sigma_{д.у.}$, МПа	76...225	106...250
$\sum\Delta\sigma_{(з, с, д.у.)}$, МПа	774	903

Научная новизна и практическая ценность

Определены технологические режимы лазерной сварки высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ, которые обеспечивают оптимальную структуру и фазовый состав и, тем самым, высокие показатели механических свойств сварных соединений. Полученные результаты показали перспективность

применения технологических режимов лазерной сварки, при которых обеспечивается необходимый комплекс механических свойств сварных соединений путем формирования наиболее благоприятной структуры металла шва и зоны термического влияния.

Выводы

1. Установлены закономерности влияния скорости лазерной сварки на структуру металла швов и зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ. Показано, что с увеличением скорости сварки от $V_{св} \sim 18$ м/ч до $V_{св} \sim 50$ м/ч изменяется фазовый состав металла швов от бейнитного до бейнитно-мартенситного, увеличивается микротвердость на 25%, уменьшается размер бейнитных пакетов в участке перегрева ЗТВ в 1,5 раза при измельчении ширины реек бейнитных структур в 1,3...2 раза.
2. При минимальных скоростях ($V_{св} \sim 18$ м/ч) лазерной сварки в металле шва сварных соединений стали 14ХГН2МДАФБ формируются градиентные по размерам зеренные структуры при неравномерном изменении микротвердости, что может приводить к снижению механических свойств, а также к снижению трещиностойкости сварных соединений.
3. Наиболее оптимальная структура исследуемых соединений формируется при скорости сварки $V_{св}=50$ м/ч, что должно обеспечивать равномерный уровень механических свойств и трещиностойкость сварных соединений.
4. На основании экспериментальных исследований, оптической и растровой микроскопии аналитическими оценками изменения механических свойств по зоне сварки показано, что наибольшие показатели предела текучести (770...900 МПа) обеспечиваются диспергированием структуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Katayama S. Handbook of laser welding technologies / Katayama S. – Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2013. – 677 p. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857098771>.
2. Cao X., Wanjara P., Huang J., Munro C. and Nolting A. Hybrid fiber laser–Arc welding of thick section high strength low alloy steel / X. Cao, P. Wanjara, J. Huang, C. Munro, A. Nolting // Materials & Design. – 2011. – Vol. 32, № 6. – P. 3399-3413.– Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.002>.
3. Markovits T., Takács J. Edge welding of laminated steel structure by pulsed Nd:YAG laser / T. Markovits, J. Takács // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5, Part B. – P. 47-52. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.028>.
4. Шелягин В. Д., Кривцун И. В., Борисов Ю. С., Хаскин В.Ю., Набок Т. Н., Сиора А. В., Бернацкий А. В., Войнарович С. Г., Кислица А. Н., Недей Т. Н. Лазерно-дуговые и лазерно-плазменные технологии сварки и нанесения покрытий / В. Д. Шелягин, И. В. Кривцун, Ю. С. Борисов, В.Ю. Хаскин, Т. Н. Набок, А. В. Сиора, А. В. Бернацкий, С. Г. Войнарович, А. Н. Кислица, Т. Н. Недей // Автоматическая сварка. – 2005. – №8. – С. 49-54. – Режим доступа: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-29144499023&partnerID=MN8TOARS>.
5. Маркашова Л.И. Влияние термических циклов сварки и внешнего нагружения на структурно-фазовые изменения и свойства соединений стали 17Х2М / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков, Е.Н. Бердникова и др. // Автоматическая сварка. – 2009. – №7. – С.21-29.
6. Маркашова Л.И. Влияние легирования швов на структуру и свойства сварных соединений стали 17Х2М / Л.И. Маркашова, В.Д. Позняков, Т.А. Алексеенко, Е.Н. Бердникова и др. // Автоматическая сварка. – 2011.– №4. – С.7-15.
7. Маркашова Л.И. Структура и эксплуатационные свойства сварных соединений металлов и сплавов / Л.И. Маркашова, В.Д. Позняков, Е.Н. Бердникова, Т.А. Алексеенко, О.С. Кушнарева, Е.В. Половецкий // Сборник трудов VIII Международной конференции Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах (19-23 сентября 2016 г, Одесса). – Киев-2016. – С.54-63.

REFERENCES

- 1 Katayama S. *Handbook of laser welding technologies*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013, 677 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857098771>.
- 2 Cao X., Wanjara P., Huang J., Munro C. and Nolting A. *Hybrid fiber laser–Arc welding of thick section high strength low alloy steel*. *Materials & Design*. 2011, vol. 32, no. 6, pp. 3399-3413. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.002>.
- 3 Markovits T., Takács J. *Edge welding of laminated steel structure by pulsed Nd:YAG laser*. *Physics Procedia*. 2010, vol. 5, part B, pp. 47-52. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.028>.
- 4 Shelyagin V. D., Krivtsun I. V., Borisov Yu. S., Haskin V. Yu., Nabok T. N., Siora A. V., Bernatskiy A. V., Voynarovich S. G., Kislitsa A. N. and Nedey T. N. *Lazerno-dugovyye i lazerno-plazmennyye tehnologii svarki i naneseniya pokryitii* [Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies]. *Avtomatischeckaya svarka* [Automatic welding]. 2005, no. 8, pp. 49-54. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-29144499023&partnerID=MN8TOARS> (in Russian).
- 5 Markashova L.I., Grigorenko G.M., Poznjakov V.D., Berdnikova E.N. i dr. *Vlijanie termicheskikh ciklov svarki i vneshnego nagruzheniya na strukturno-fazovye izmeneniya i svoystva soedinenij stali 17Kh2M* [Influence of welding thermal cycles and external loading on the structural and phase transformations and properties of the joints of 17Kh2M steel]. *Avtomatischeckaya svarka*, 2009, no. 7, pp. 21-29. (in Russian).
- 6 Markashova L.I., Poznjakov V.D., Alekseenko T.A., Berdnikova E.N. i dr. *Vlijanie legirovaniya shvov na strukturu i svoystva svarnyh soedinenij stali 17Kh2M* [Effect of weld doping on the structure and properties of welded joints of 17Kh2M steel]. *Avtomatischeckaya svarka*, 2011, no. 4, pp. 7-15. (in Russian).
- 7 Markashova L.I., Poznjakov V.D., Berdnikova E.N., Alekseenko T.A. i dr. *Struktura i ekspluatatsionnye svoystva svarnyh soedinenij metallov i splavov* [Structure and service properties of welding joints of metals and alloys] // *Zbornik trudov VIII Mezhdunarodnoy konferentsii Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tehnologii v svarce i rodstvennyh procesah* (19-23 sentabra 2016 g., Kiev). –Kiev-2016, pp.54-63.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., наук, проф. Лаухніним Д.В., д.т.н., проф. Сухомлиним Г.Д. (Україна)