

УДК 621.791.725:621.791.755.5

ВЛИЯНИЕ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

БУШМА А. И.¹, к.т.н.,
БЕРДНИКОВА Е. Н.¹, к.т.н.,
ХАСКИН В. Ю.¹, д.т.н.,
ПОЗНЯКОВ В. Д.¹, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины,
СИДОРЕЦ В. Н.^{2*}, д.т.н., проф.

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, 03650, Киев, Украина

^{2*} Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, 03650, Киев, Украина, тел. +38 (044) 205-23-47, e-mail: svdorvn@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1343-775X

Аннотация. *Цель.* Преимуществами гибридной лазерно-дуговой сварки при производстве сварных конструкций из высокопрочных сталей являются: значительное (в 3-5 раз) снижение погонной энергии; повышение производительности за счет увеличения скорости сварки на порядок; получение равновесных мелкозернистых структур в швах и ЗТВ, повышающих прочность соединений и снижающих склонность к трещинообразованию. В результате воздействия термического цикла сварки и влияния легирования швов структура и фазовый состав металла шва и зоны термического влияния могут существенно изменяться и, соответственно, влиять на уровень механических свойств и трещиностойкость сварных соединений. Возникает необходимость поиска решений проблемы путем проведения комплексных технологических и материаловедческих экспериментов. Поэтому целью исследований было установление влияния технологических режимов, в первую очередь погонной энергии, гибридной лазерно-дуговой и лазерной (для сравнения) сварки высокопрочной стали на формирование структуры в металле швов сварных соединений, а также анализ влияния этой структуры на их механические свойства. **Методика.** Исследовалась сталь N-A-XTRA-70, которая широко применяется в странах Евросоюза при изготовлении ответственных конструкций различного назначения. Для проведения экспериментов был создан лабораторный стенд, эксперименты на котором проводились по технологической схеме, предусматривающей расположение дуги плавящегося электрода на некотором расстоянии перед лазерным пучком по ходу сварки. Источником лазерного излучения был Nd:YAG-лазер DY 044 фирмы ROFIN (Германия). Питание дуги плавящегося электрода осуществлялось от сварочного генератора ПСГ-500. Исследования структурно-фазовых изменений в металле швов и ЗТВ сварных соединений проводили с помощью световой микроскопии. **Результаты и научная новизна.** Проведенные исследования впервые позволили установить оптимальные технологические режимы лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки для получения качественных и надежных сварных соединений высокопрочной стали с точки зрения формирования структуры и фазового состава металла, обеспечивающих высокие показатели механических свойств сварных соединений. **Практическая значимость.** Представленные в статье результаты экспериментальных исследований обладают высокой практической ценностью. Они станут основой для новых перспективных технологических разработок в области лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки высокопрочных сталей.

Ключевые слова: гибридная лазерно-дуговая сварка; лазерная сварка; высокопрочные стали; сварные конструкции; структура металла; фазовый состав металла; механические свойства; трещиностойкость

ВПЛИВ ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ ГИБРИДНОГО ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ І МЕХАНИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМЦІННИХ СТАЛЕЙ

БУШМА О. І.¹, к.т.н.,
БЕРДНІКОВА О. М.¹, к.т.н.,
ХАСКИН В. Ю.¹, д.т.н.,
ПОЗНЯКОВ В. Д.¹, д.т.н., чл.-корр. НАН України,
СИДОРЕЦЬ В. М.^{2*}, д.т.н., проф.

¹ Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Боженка, 11, 03650, Київ, Україна

^{2*} Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Боженка, 11, 03650, Київ, Україна, тел. +38 (044) 205-23-47, e-mail: svdorvn@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1343-775X

Анотація. Мета. Перевагами гібридного лазерно-дугового зварювання при виробництві зварних конструкцій з високоміцних сталей є значне (в 3-5 раз) зниження погонної енергії; підвищення продуктивності за рахунок збільшення швидкості зварювання на порядок; одержання рівноважних дрібнозернистих структур у швах та ЗТВ, які підвищують міцність з'єднань та знижують схильність до тріщинотворення. В результаті дії термічного циклу зварювання і впливу легування швів структура та фазовий склад металу шва і зони термічного впливу можуть суттєво змінюватися і, відповідно, впливають на рівень механічних властивостей і тріщиностійкість зварних з'єднань. Виникає необхідність пошуку вирішення проблеми шляхом проведення комплексних технологічних і матеріалознавчих експериментів. Тому метою досліджень було встановлення впливу технологічних режимів, в першу чергу погонної енергії, гібридного лазерно-дугового та лазерного (для порівняння) зварювання високоміцної сталі на формування структури в металі швів зварних з'єднань, а також аналіз впливу цієї структури на їх механічні властивості. **Методика.** Досліджувалась сталь N-A-XTRA-70, яка широко застосовується в країнах Євросоюзу при виготовленні відповідальних конструкцій різноманітного призначення. Для проведення експериментів було створено лабораторний стенд, досліди на якому проводилися за технологічною схемою, що передбачає розташування дуги плавкого електрода на певній відстані перед лазерним пучком по ходу зварювання. Джерелом лазерного випромінювання був Nd:YAG-лазер DY 044 фірми ROFIN (Німеччина). Живлення дуги плавкого електрода здійснювалося від зварювального генератора ПСГ-500. Дослідження структурно-фазових змін в металі швів та ЗТВ зварних з'єднань проводили за допомогою світлової мікроскопії (оптичні мікроскопи Versamet-2 і Neophot-32), мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі М-400 фірми Лесо. **Результати та наукова новизна.** Проведені дослідження вперше дозволили встановити оптимальні технологічні режими лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання для одержання якісних та надійних зварних з'єднань високоміцної сталі з точки зору формування структури і фазового складу металу, які забезпечують високі показники механічних властивостей зварних з'єднань. **Практична значимість.** Представлені в статті результати експериментальних досліджень мають високу практичну цінність. Вони стануть основою для нових перспективних технологічних розробок в області лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання високоміцних сталей.

Ключові слова: гібридне лазерно-дугове зварювання; лазерне зварювання; високоміцні сталі; зварні конструкції; структура металу; фазовий склад металу; механічні властивості; тріщиностійкість

INFLUENCE OF ENERGY PER UNIT LENGTH OF HYBRID LASER-ARC WELDING ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH STRENGTH STEELS

BUSHMA O. I.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
 BERDNIKOVA O. M.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
 KHASKIN V. YU.¹, *Dr. Sc. (Tech.)*,
 POZNIAKOV V. D.¹, *Dr. Sc. (Tech.)*, *Corr. Member of the NAS of Ukraine*,
 SYDORETS V. M.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.)*, *Prof*

¹ Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Bozhenko str., 11, 03650, Kyiv, Ukraine

^{2*} Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Bozhenko str., 11, 03650, Kyiv, Ukraine, тел. +38 (044) 205-23-47, e-mail: svdorvn@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-1343-775X

Abstract. Purpose. The advantages of hybrid laser-arc welding in the production of weldments of high-strength steels are: considerable (in 3-5 times) reduction in energy per unit length; increased productivity through increasing on the order the speed of welding; obtaining equilibrium fine grain structures in the welds and HAZ, which increase the toughness of weld joints and reduces the disposition to the crack formation. As the result of action of the welding thermal cycle and the influence of weld alloying the structure and phase composition of the weld metal and HAZ may change significantly, and, accordingly, influence on the level of mechanical properties and crack resistance of welded joints. The need to find solutions problem appears by conducting complex technological and materials science experiments. Therefore, the purpose of the research is the establishment of the influence of technological modes, primarily the energy per unit length, hybrid laser-arc and laser (for comparison) welding of high strength steel on the formation of structure in the metal welds, as well as analysis of the influence of this structure on their mechanical properties. **Methodology.** Steel NA-XTRA-70 was investigated because this steel is widely used in the EU countries in the manufacture of critical constructions for various purposes. For the experiments the laboratory stand has been created on which the experiments were carried out in the technological scheme that provides the location of the consumable electrode arc at a certain distance in front of the laser beam in the welding direction. Nd: YAG-laser DY 044 of company ROFIN (Germany) was a laser radiation source. Power for consumable electrode arc was carried out by welding generator PSG-500. Studies of structural and phase changes in the weld metal and HAZ of welds was carried out using by light microscopy (optical microscopes Versamet-2 and Neophot-32), microhardness was measured on M-400 micro durometer of company Leco. **Findings and originality.** Carried out researches for the first time allowed to establish optimal technological modes of laser and hybrid laser-arc welding to produce quality and reliable welded

joints of high-strength steel from the standpoint the structure formation and phase composition of the metal, providing high mechanical properties of welded joints. **Practical value.** Presented in the article the results of experimental studies have high practical value. They will form the basis for new perspective technological developments in the field of laser and hybrid laser-arc welding of high strength steels.

Keywords: hybrid laser-arc welding; laser welding; high-strength steel; weldments; metal structure; phase composition of the metal; mechanical properties; crack resistance

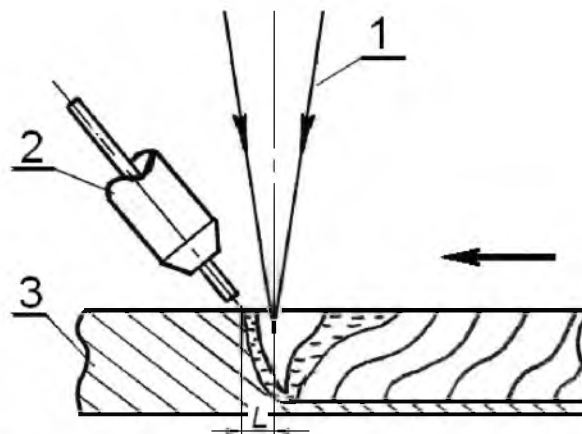
Введение

В современной промышленности для снижения металлоемкости ответственных конструкций часто используют высокопрочные стали. Из них изготавливают стрелы кранов, бетономешалки, трубопроводы высокого давления, конструкции морских платформ и др. Для соединения деталей этих конструкций широко используется дуговая сварка плавящимся электродом. Однако, данный вид сварки имеет такие недостатки, как склонность к образованию трещин, внутренних пор и возникновение остаточных деформаций в сварных конструкциях [1]. Для устранения этих недостатков используют альтернативные методы сварки, например, контактную или контактно-дуговую. Однако, такие типы сварки требуют значительных усилий прижима и не всегда могут быть реализованы конструктивно.

Одним из путей устранения недостатков получения сварных соединений из высокопрочных сталей, характерных для сварки плавящимся электродом, является ее замена гибридной лазерно-дуговой сваркой [2]. Преимуществами такого вида сварки являются: значительное (в 3-5 раз) снижение погонной энергии; повышение производительности за счет увеличения скорости сварки на порядок; получение равновесных мелкозернистых структур в швах и ЗТВ, повышающих прочность соединений и снижающих склонность к трещинообразованию. Однако в результате воздействия термического цикла сварки и влияния легирования швов 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 [3-5]. Поэтому возникает необходимость поиска решений путем проведения комплексных технологических и материаловедческих экспериментов.

Цель

Целью данной работы является установление влияния технологических режимов, в первую очередь погонных энергий, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки высокопрочной стали N-A-XTRA-70 на формирование структуры в металле швов сварных соединений, а также анализ влияния этой структуры на механические свойства сварных соединений.



a)



b)

Рис. 1. Технологическая схема (a) и лабораторный стенд (b) для проведения экспериментов по лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки высокопрочных сталей / Technological scheme (a) and laboratory stand (b) to carry out experiments on laser and hybrid laser-arc welding of high strength steels

Методика

Объектом исследования была выбрана сталь N-A-XTRA-70 (C ~ 0,15%; Si ~ 0,63%; Mn ~ 0,85%; Cr ~ 0,65%; Ni ~ 0,12%; Mo ~ 0,13%; Al ~ 0,04%; S ~ 0,01%; P ~ 0,015%; N₂ ~ 0,015%), как представитель класса высокопрочных сталей. Она широко применяется в странах Евросоюза при изготовлении ответственных конструкций различного назначения.

Для проведения экспериментов была выбрана технологическая схема, приведенная на рис.1, а. Согласно этой схеме, перед лазерным пучком 1 по ходу сварки располагают дугу плавящегося электрода 2 на расстоянии L, равном 1...2 мм. В качестве источника лазерного излучения использовали Nd:YAG-лазер DY 044 фирмы ROFIN (Германия) мощностью излучения до 4,4 кВт. Питание дуги плавящегося электрода осуществляли от сварочного генератора ПСГ-500. Сила тока составляла 160 А. Свариваемые образцы 3 изготавливали из высокопрочной стали N-A-XTRA-70 толщиной δ = 8 мм. Лазерную сварку осуществляли со скоростями 40 и 50 м/ч (11,1 и 18,9 мм/с), гибридную – 72 и 90 м/ч (20 и 25 мм/с). Во всех случаях в качестве защитного газа подавали смесь Ag + CO₂ с расходом 15...20 л/мин (250...333 см³/с). Внешний вид лабораторного стенда для проведения экспериментов показан на рис.1, б.

Таблица 1

Режимы лазерной и лазерно-дуговой сварки стали N-A-XTRA-70 (δ=8 мм) / Modes of laser and laser-arc welding of NA-XTRA-70 steel (δ = 8 mm)

Вид сварки	Мощность излучения P, кВт	Сварочный ток I, А	Напряжение на дуге U, В	Скорость V _{св} , м/ч (мм/с)	Погонная энергия E, Дж/мм
Лазерная	4,4	-	-	40 (11,1)	400
Лазерная	4,4	-	-	50 (18,9)	320
Гибридная лазерно-дуговая	4,4	160	26	72 (20)	430
Гибридная лазерно-дуговая	4,4	160	26	90 (25)	340

Лазерная сварка выполнялась без применения присадочных материалов, а гибридная – с применением электродной проволоки Union NiMoCr (Ø 1,0 мм, C ~ 0,17%; Si ~ 0,53%; Mn ~ 1,68%; Cr ~ 0,12%; Ni ~ 1,54%; Mo ~ 0,62%; S ~ 0,011%; P ~ 0,017%). Погонные энергии определяли, как отношение мощности сварочного источника к скорости сварки. Режимы проведения экспериментов приведены в табл.1. Погонная энергия лазерной сварки, выполненной со скоростью 50 м/ч, и

погонная энергия гибридной сварки, выполненной со скоростью 90 м/ч, близки, что позволяет сравнивать структуры соответствующих швов между собой. Примеры макроструктур таких швов показаны на рис.2. Аналогичное сравнение вполне допустимо и для лазерной сварки со скоростью 40 м/ч и гибридной сварки со скоростью 72 м/ч.

В случае гибридной сварки (рис.2, справа) объем переплавленного металла больший, чем при лазерной (рис.2, слева). Это объясняется возникновением, так называемого гибридного эффекта, заключающегося в неаддитивности совместного воздействия лазерного и дугового источников энергии на свариваемый материал.

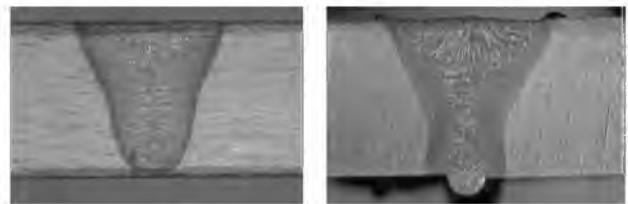


Рис. 2. Макроструктуры стыковых швов, выполненных лазерным способом (слева) со скоростью 50 м/ч и гибридным лазерно-дуговым способом (справа) со скоростью 90 м/ч на образцах из стали N-A-XTRA-70 (δ = 8 мм) / Macrostructures of butt welds made by laser manner (left) at a speed of 50 m/h and the hybrid laser-arc manner (right) with the speed of 90 m/h of the NA-XTRA-70 steel samples (δ = 8 mm)

Размер ЗТВ при гибридной сварке превышает размер ЗТВ при лазерной, что связано с несколько большей погонной энергией. Размер дендритов при гибридной сварке больший, чем при лазерной, что связано с действием дуговой составляющей.

Для сравнения значений пределов текучести σ_{0,2} и прочности σ_B при различных способах сварки стали N-A-XTRA-70, из сваренных этими способами стыковых соединений изготавливали образцы Ми-18 ГОСТ 6996-66. Механические испытания проводились при помощи машины MTS 810. Для определения каждого из значений изготавливали и испытывали по три образца, после чего полученные данные усредняли. По этим данным построили диаграмму, приведенную на рис. 3.

Результаты

По результатам механических испытаний установлено следующее.

Лазерная сварка. Наиболее высоким уровнем предела текучести (σ_{0,2} ~ 862,5 МПа) характеризуются швы, выполненные при V_{св} ~ 50 м/ч. Более низкие значения характерны для V_{св} ~ 40 м/ч: σ_{0,2} ~ 855,6...860,1 МПа. Результаты испытаний образцов на ударный изгиб при температурах испытаний T_{исп} от +20° до -40°С показали незначительное уменьшение ударной вязкости (до KCV⁺²⁰ = 45,6 Дж/см²) в металле швов,

выполненных при $V_{CB} \sim 50$ м/ч. Однако сварные соединения, выполненные при $V_{CB} \sim 50$ м/ч, отличаются наибольшей хладостойкостью (до $KCV^{-40} = 24,1$ Дж/см²) по сравнению с $V_{CB} \sim 40$ м/ч ($KCV^{-40} = 14,0$ Дж/см²).

Гибридная сварка. Наиболее высокие значения предела текучести ($\sigma_{0,2} \sim 1147,2$ МПа) характерны для швов, выполненных при $V_{CB} \sim 90$ м/ч. Однако практически в 2 раза снижаются показатели пластичности ($\psi \sim 38,2\%$) по сравнению с $V_{CB} \sim 72$ м/ч ($\psi \sim 61,6\%$). Также из диаграммы (рис. 3) видно, что наилучшие показатели текучести и прочности сварных соединений стали N-A-XTRA-70 имеют место при гибридной лазерно-дуговой сварке.

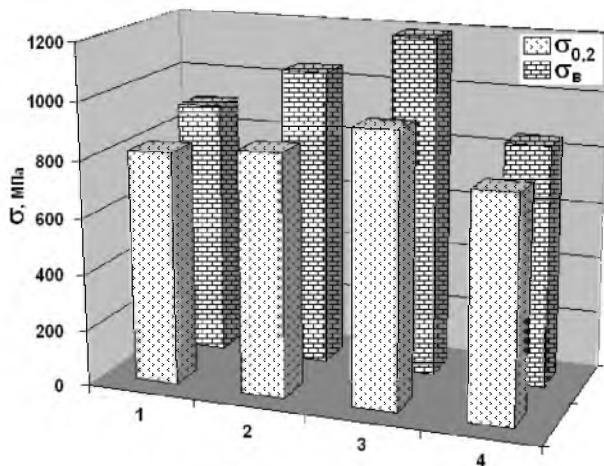


Рис. 3. Значения пределов текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_B [МПа] для различных способов сварки стали N-A-XTRA-70: 1 – дуговая; 2 – лазерная; 3 – гибридная лазерно-дуговая; 4 – основной металл. / Values of yield strength $\sigma_{0,2}$ and toughness σ_B [MPa] for different types of welding of NA-XTRA-70 steel: 1 – arc; 2 – laser; 3 – hybrid laser-arc; 4 – base metal.

Таким образом, из результатов механических испытаний видно, что режимы сварки оказывают существенное влияние на механические свойства сварных соединений, что, по-видимому, связано с особенностями формирующейся структуры и фазового состава металла.

Исследования структурно-фазовых изменений в металле швов и ЗТВ сварных соединений проводили с помощью световой микроскопии (оптические микроскопы Versamet-2 и Neophot-32), микротвердость измеряли на микротвердомере М-400 фирмы Лесо при нагрузке 100 г.

В результате металлографических исследований структурно-фазовых составляющих: бейнита верхнего (B_B); бейнита нижнего (B_H); мартенсита (М); феррита (Ф); размера зерен (D_3); коэффициента формы кристаллитов ($\alpha = l/h$), формирующихся в металле швов и различных участках ЗТВ, а также соответствующих изменений микротвердости (HV) установлено следующее. Структура основного металла бейнитно-ферритная с размером зерен

$D_3 \sim 10...25$ мкм и микротвердостью $HV = 2740...2850$ МПа.

В случае **лазерной сварки** при минимальной скорости ($V_{CB} \sim 40$ м/ч) фазовый состав металла шва и участка перегрева одинаковый – мартенситный (М). Размер зерен в шве составляет $D_3 \sim 50...150 \times 300...600$ мкм с коэффициентом их формы $\alpha \sim 4...6$, и микротвердостью $HV(M) = 4250...4640$ МПа (рис. 4, a). При переходе к ЗТВ микротвердость в среднем понижается на 8% ($HV(M) \sim 4010...4290$ МПа), размер зерна в участке перегрева составляет $D_3 \sim 30...100$ мкм (рис. 4, b и рис. 5, a).

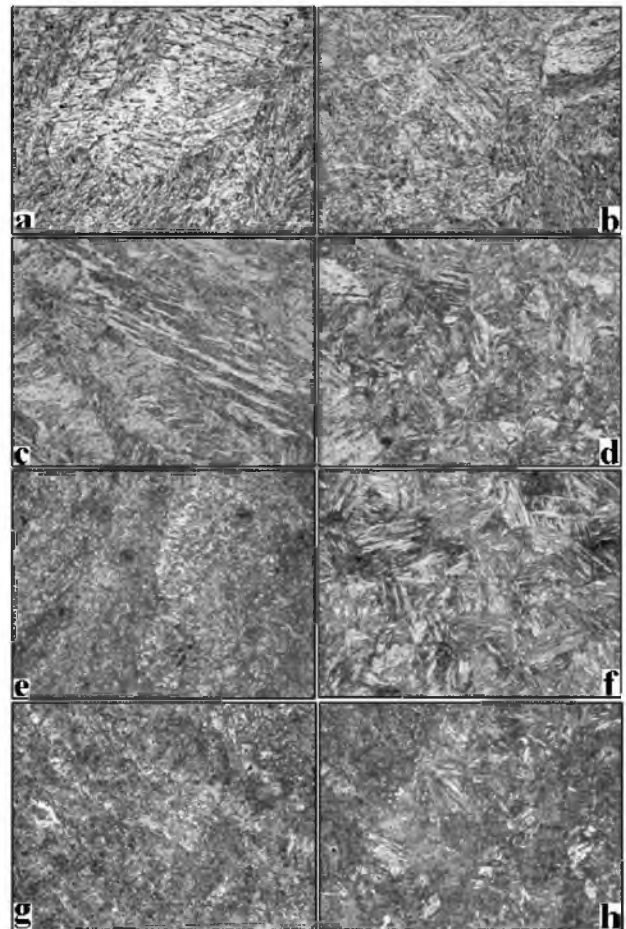


Рис. 4. Микроструктура металла (x500) швов (a, c, e, g) и участка перегрева ЗТВ (b, d, f, h) при лазерной сварке: $V_{CB} \sim 40$ м/ч (a, b); 50 м/ч (c, d) и гибридной лазерно-дуговой сварке: $V_{CB} \sim 72$ м/ч (e, f); 90 м/ч (g, h) / The microstructure of the metal (x500) welds (a, c, e, g) and the overheating area of HAZ (b, d, f, h) laser welding: $V_{CB} \sim 40$ m/h (a, b); 50 m/h (c, d) and hybrid laser-arc welding: $V_{CB} \sim 72$ m/h (e, f); 90 m/h (g, h)

В случае лазерной сварки со скоростью $V_{CB} \sim 50$ м/ч фазовый состав шва и участка перегрева бейнитно-мартенситный (преимущественно нижний бейнит, B_H , рис. 4, c). Размер зерен в шве составляет $D_3 \sim 50...120 \times 200...400$ мкм с коэффициентом их формы $\alpha \sim 3...4$ при $HV(B-M) = 3830...4640$ МПа. Размер зерна в участке перегрева составляет $D_3 \sim 20...60$ мкм, микротвердость так же снижается

на 7%: $HV(B-M) = 3830...4010$ МПа (рис. 4, d и рис. 5, b).

Таким образом, при увеличении скорости сварки от $V_{CB} \sim 40$ м/ч до 50 м/ч изменяется фазовый состав металла швов от мартенситного до бейнитно-мартенситного ($B_H > M$); микротвердость снижается в среднем на 6% при измельчении зеренной структуры в 1,2...1,3 раза и уменьшении коэффициента формы зерна.

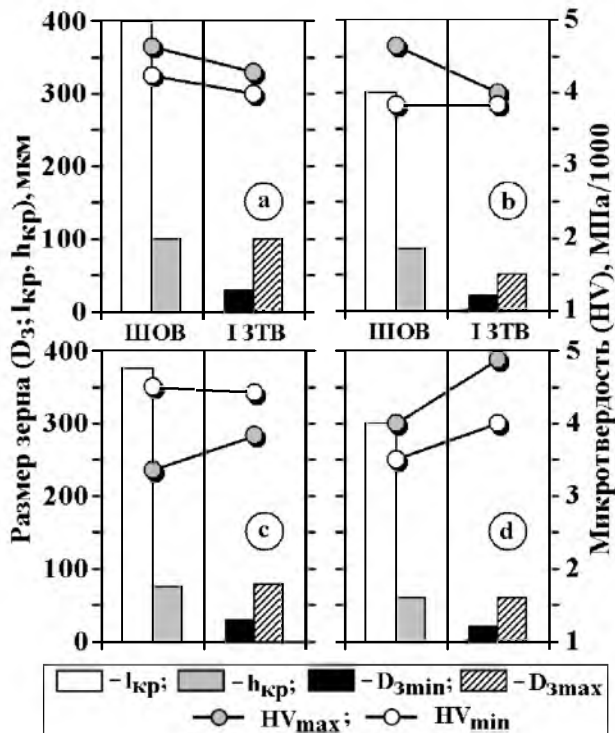


Рис. 5. Изменение структурных параметров - размеров кристаллитов ($h_{кр}$; $l_{кр}$), величины зерна (D_3) и микротвердости (HV) в металле шва и ЗТВ сварных соединений стали N-A-XTRA-70, в зависимости от скорости лазерной (a – 40 м/ч; b – 50 м/ч) и гибридной лазерно-дуговой (c – 72 м/ч; d – 90 м/ч) сварки / . Changing the structural parameters - crystallite size ($h_{кр}$; $l_{кр}$), grain size (D_3), and microhardness (HV) in the weld metal and of HAZ of welded joints of NA-XTRA-70 steel, depending on the speed of the laser (a – 40 m / h; b – 50 m / h) and the hybrid laser-arc (c – 72 m / hr; d – 90 m / h) welding

При этом фазовый состав металла участка перегрева ЗТВ также изменяется от мартенситного до бейнитно-мартенситного ($B_H - M$, преимущественно B_H), зеренная структура измельчается в 1,5...2 раза при снижении микротвердости в среднем на 6%.

При гибридной сварке со скоростью $V_{CB} \sim 72$ м/ч структура металла швов и ЗТВ – бейнитно-мартенситная ($B-M$, в основном B_H) (рис. 4, e, f). Величина зерна $D_3 \sim 40...80 \times 350...400$ мкм с коэффициентом формы $\alpha \sim 6...8$ и $HV(B-M) = 3360...4500$ МПа. В участке перегрева ЗТВ

зеренная структура с $D_3 \sim 20...70$ мкм при повышении HV в среднем на 5% (рис. 5, c).

При увеличении скорости гибридной сварки до $V_{CB} \sim 90$ м/ч структура металла шва бейнитно-мартенситная ($B-M$, преимущественно B_H), (рис. 4, g). Размер зерен в шве составляет $D_3 \sim 40...60 \times 300...400$ мкм с коэффициентом их формы $\alpha \sim 7$, и микротвердостью $HV(B-M) = 3510...4010$ МПа. При переходе к ЗТВ микротвердость увеличивается в среднем на 18% ($HV(M) \sim 4010...4880$ МПа), размер зерна в участке перегрева составляет $D_3 \sim 20...60$ мкм (рис. 4, h и рис. 5, d).

Таким образом, при увеличении скорости сварки от $V_{CB} \sim 72$ м/ч до 90 м/ч фазовый состав металла шва не изменяется, однако изменяется доля фазовых составляющих: при $V_{CB} \sim 72$ м/ч – в основном B_H ; при $V_{CB} \sim 90$ м/ч – это $B_H + M$, микротвердость незначительно снижается в среднем на 4% при измельчении зеренной структуры в 1,2 раза. Коэффициент формы зерна почти не изменяется. При этом фазовый состав металла ЗТВ изменяется от бейнитно-мартенситного ($B_H - M$) до мартенситного (M), зеренная структура измельчается в 1,4 раза при увеличении микротвердости в среднем на 8%.

Научная новизна и практическая значимость

Проведенные исследования впервые позволили установить оптимальные технологические режимы лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки для получения качественных и надежных сварных соединений высокопрочной стали с точки зрения формирования структуры и фазового состава металла, обеспечивающих высокие показатели механических свойств сварных соединений.

Представленные в статье результаты экспериментальных исследований обладают высокой практической ценностью. Они станут основой для новых перспективных технологических разработок в области лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки высокопрочных сталей.

Выводы

В итоге проведенными исследованиями показано, что наиболее оптимальная структура металла сварных соединений с точки зрения равномерного изменения структурных параметров и отсутствия градиентов по микротвердости, формируется при скорости лазерной сварки 50 м/ч (погонная энергия 400 Дж/мм) и гибридной сварки 72 м/ч (погонная энергия 430 Дж/мм), что должно обеспечить равномерный уровень механических свойств по зонам сварных соединений и трещиностойкость сварных соединений.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ
/ REFERENCES**

1. Мусияченко В.Ф. Дуговая сварка высокопрочных легированных сталей / В. Ф. Мусияченко, Л.И. Миходуй. – Москва: Машиностроение, 1987. – 80 с.

Musiyachenko V.F., Mikhoduy L.I. Duhovaya svarka vysokoprochnykh leghovannykh staley. [Arc welding of high-strength alloy steels]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1987. 80 p.

2. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисуров / Под ред. А.Г. Григорьянца. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.

Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskiye protsessy lazernoy obrabotki: Ucheb. posobyе dlya vuzov / Pod red. A.N. Hryhor'yantsa. [Technological processes of laser treatment: Manual for high schools / Ed. A.G. Grigoryants]. Moscow, Bauman Univ., 2006. 667 p.

3. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и свойства стали при сварке [Текст] / М.Х. Шоршоров, В.В. Белов – Москва: Наука, 1972. – 220 с.

Shorshorov M.Kh., Belov V.V. Fazovye prevrashheniya i svojstva stali pri svarke. [Phase transformations and properties of steel at welding]. Moscow, Nauka, 1972. 220 p.

4. Влияние термических циклов сварки и внешнего нагружения на структурно-фазовые изменения и свойства соединений стали 17Х2М [Текст] / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков, Е.Н. Бердникова и др. // Автоматическая сварка. – 2009. – №7. – С.21-29.

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 svojstva 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]. Avtomaticheskaja svarka, 2009, no. 7, pp. 21-29.

<http://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2009/07/03>

5. Влияние легирования швов на структуру и свойства сварных соединений стали 17Х2М [Текст] / Л.И. Маркашова, В.Д. Позняков, Т.А. Алексеенко, Е.Н. Бердникова и др. // Автоматическая сварка. – 2011. – №4. – С.7-15.

Markashova L.I., Poznjakov V.D., Alekseenko T.A., Berdnikova E.N. i dr. Vlijanie legirovaniya shvov na strukturu i svojstva svarnyh soedinenij stali 17Kh2M [Effect of weld doping on the structure and properties of welded joints of 17Kh2M steel]. Avtomaticheskaja svarka, 2011, no. 4, pp. 7-15.

<http://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2011/04/02>

Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); д-ром. физ.-мат. наук, проф. А. В. Коваленко (Украина)

Поступила в редколлегию 23.03.2015

Принята к печати 30.03.2015