

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ N-A-XTRA-70, ПОЛУЧЕННЫХ ДУГОВОЙ, ЛАЗЕРНОЙ И ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКОЙ

В. Д. ПОЗНЯКОВ, В. Д. ШЕЛЯГИН, С. Л. ЖДАНОВ, А. В. БЕРНАЦКИЙ, А. В. СИОРА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе выполнена сравнительная оценка механических свойств стыковых сварных соединений из высокопрочной стали N-A-XTRA-70 толщиной 8 мм, полученных дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сваркой. Проведенные механические испытания на статическое растяжение и на ударный изгиб с V-образным надрезом показали, что с понижением погонной энергии дуговой сварки показатели статической прочности возрастают, а показатели пластичности почти не меняются. В то же время показатели ударной вязкости металла шва и металла ЗТВ снижаются примерно в 1,5...1,8 раза. Это связано с тем, что при увеличении скорости сварки с 18 до 50 м/ч изменяется фазовый состав металла швов с ферритно-бейнитного на бейнитно-мартенситный. При лазерной сварке показатели статической прочности металла швов снижаются на 18...20 %, а пластичности возрастают в 1,8 раза с повышением скорости сварки и охлаждения металла ЗТВ сварных соединений. При увеличении скорости лазерной сварки с 40 до 50 м/ч фазовый состав металла швов изменяется с мартенситного на бейнитно-мартенситный (с долей мартенсита, превышающей 60 %). При гибридной лазерно-дуговой сварке повышение скорости сварки приводит к увеличению на 10...15 % показателей статической прочности и пластичности. Эти изменения происходят из-за того, что изменяется доля фазовых составляющих. В расплавленном металле образцов, выполненных лазерным способом, и наплавленном металле, выполненным дуговым и гибридным лазерно-дуговым способами, наблюдаются ультрамикроскопические концентрации содержания диффузионного водорода, а именно 0,07, 0,2...0,3 и 0,4 мл/100 г соответственно. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, стыковые соединения, дуговая сварка, лазерная сварка, гибридная лазерно-дуговая сварка, механические свойства, диффузионный водород

Низколегированные высокопрочные стали с пределом текучести 600...900 МПа применяются для изготовления тяжело нагруженных сварных конструкций в строительстве и машиностроении [1–4]. Их применение обеспечивает снижение массы конструкций, повышает эксплуатационную надежность и долговечность машин, механизмов и сооружений. Особенно эффективно применение высокопрочных сталей при изготовлении подъемно-транспортных средств.

Металлургические процессы сварки высокопрочных низколегированных сталей должны удовлетворять двум основным требованиям: обеспечивать минимальную насыщенность металла шва водородом; обеспечивать получение металла шва оптимального химического состава с ограниченным содержанием углерода, вредных примесей (сера и фосфор) и неметаллических включений [1]. Оба требования связаны, во-первых, с необходимостью предупреждения образования холодных трещин в металле различных участков сварного соединения и, во-вторых, с необходимостью получения металла шва и металла зоны термического влияния (ЗТВ) с достаточно высоким уровнем механических свойств.

В последние годы в мире с целью уменьшения деформаций и повышения качества сварных тон-

костенных металлических конструкций для изготовления изделий из сталей ферритно-перлитного класса все чаще предлагаются технологические процессы, основанные на использовании лазерного и гибридного лазерно-дугового способов сварки [5–10]. По нашему мнению, подобный подход может быть приемлемым и для сварки высокопрочных бейнитно-мартенситных сталей. Однако учитывая то, что эти стали склонны к образованию закалочных структур и имеют повышенную склонность к замедленному разрушению, которая усиливается под влиянием диффузионного водорода, возникает необходимость в исследовании особенностей насыщенности металла шва водородом, протекания термомеханических циклов при лазерном и гибридном лазерно-дуговом процессах сварки по сравнению с дуговым и установлении их влияния на структуру и свойства сварных соединений высокопрочных бейнитно-мартенситных сталей.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка свойств стыковых сварных соединений из высокопрочной стали N-A-XTRA-70 толщиной 8 мм, полученных дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сваркой.

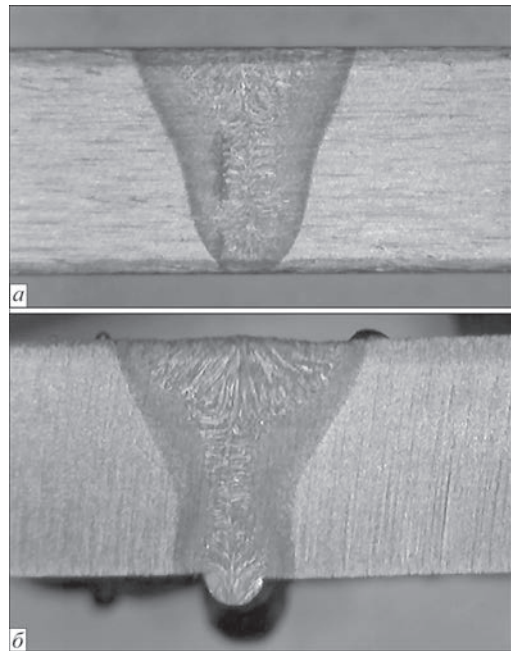
При сварке дуговым способом стыковых соединений из стали N-A-XTRA-70 (химический состав стали, мас. %: 0,15 C; 0,63 Si; 0,85 Mn; 0,65 Cr; 0,12 Ni; 0,13 Mo; 0,04 Al; 0,01 S; 0,015 P; 0,015 N₂) толщиной 8 мм, использовали проволоку сплошного сечения Union NiMoCr (химический состав проволоки, мас. %: 0,17 C; 0,53 Si; 1,68 Mn; 0,12 Cr; 1,54 Ni; 0,62 Mo; 0,011 S; 0,017 P) диаметром 1 мм. Сварку выполняли на режимах $I_{св} = 230...250$ А, $U_{д} = 28...32$ В в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO₂, на скоростях $v_{св} = 18, 30, 40$ и 50 м/ч.

Лазерную сварку стыковых соединений из стали N-A-XTRA-70 толщиной 8 мм выполняли без присадочного металла в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO₂, на скоростях $v_{св} = 40$ и 50 м/ч, при мощности лазерного излучения $P = 4,4$ кВт и величине расфокусировки $\Delta F = -2$ мм.

При сварке гибридным лазерно-дуговым способом стыковых соединений из стали N-A-XTRA-70 толщиной 8 мм использовали проволоку сплошного сечения Union NiMoCr диаметром 1 мм. Сварку выполняли в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO₂, на скоростях $v_{св} = 72$ и 90 м/ч, при мощности лазерного излучения $P = 4,4$ кВт, величине расфокусировки $\Delta F = -1,5$ мм, сварочном токе $I_{св} = 120...130$ А, напряжении $U_{д} = 22...24$ В.

Для сварных соединений, выполненных с равной величиной погонной энергии $Q_{св} \approx 3$ кДж/см в случае применения лазерной сварки (рис. 1, а) объем переплавленного металла меньше, чем при гибридной (рис. 1, б). Это объясняется возникновением так называемого гибридного эффекта, заключающегося в неаддитивности совместного воздействия лазерного и дугового источников энергии на свариваемый материал [8]. Для исследования влияния термических циклов на структуру и свойства металла ЗТВ сварных соединений стали N-A-XTRA-70 были проведены работы по фиксации процессов нагрева и охлаждения при лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварке. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют, что скорость охлаждения в интервале температур 600...500 °С при гибридной лазерно-дуговой сварке составляет примерно $w_{6/5} = 61...63$ °С/с, а при лазерной сварке $w_{6/5} = 65...103$ °С/с. Для проведения механических испытаний из сварных соединений изготавливали образцы на статическое растяжение (тип I по ГОСТ 6996–66) и на ударный изгиб (тип XI по ГОСТ 6996–66) в V-образным надрезом. Образцы на растяжение испытывали при комнатной температуре, а на ударный изгиб при температуре 20, –20 и –40 °С.

Проведенные механические испытания показали (таблица), что с понижением погонной энергии дуговой сварки показатели статической прочности возрастают с $\sigma_{0,2} \approx 731$ до $\sigma_{0,2} \approx 822$ МПа и с $\sigma_{в} \approx 817$ до $\sigma_{в} \approx 910$ МПа, а показатели пластич-



Макроструктура поперечных сечений стыковых сварных соединений, выполненных из стали N-A-XTRA-70 ($\delta = 8$ мм), лазерным (а) и гибридным лазерно-дуговым (б) способами с равной величиной погонной энергии $Q_{св} \approx 3$ кДж/см

ности почти не меняются и составляют в среднем $\delta_5 \approx 19\%$, $\psi \approx 63\%$. В то же время показатели ударной вязкости металла шва и металла ЗТВ снижаются примерно в 1,5...1,8 раза. Как показывают результаты металлографических исследований, это связано с тем, что при увеличении скорости сварки с 18 до 50 м/ч изменяется фазовый состав металла швов с ферритно-бейнитного на бейнитно-мартенситный и на 30 % увеличивается микротвердость.

Результаты проведенных исследований влияния режимов лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки на механические свойства металла шва и сварных соединений высокопрочной стали N-A-XTRA-70 толщиной 8 мм свидетельствуют (таблица), что при лазерной сварке показатели статической прочности металла швов снижаются на 18...20 %, а пластичности возрастают в 1,8 раза с повышением скорости сварки и охлаждения металла ЗТВ сварных соединений. Результаты металлографических исследований показывают, что при увеличении скорости лазерной сварки с 40 до 50 м/ч фазовый состав металла швов изменяется с мартенситного на бейнитно-мартенситный (с долей мартенсита, превышающей 60 %).

При гибридной лазерно-дуговой сварке повышение скорости сварки приводит к увеличению на 10...15 % показателей статической прочности. Как показывают результаты металлографических исследований, эти изменения происходят из-за того, что изменяется доля фазовых составляющих: при $v_{св} = 72$ м/ч, $B_{н} > B_{в} + M$; при $v_{св} = 90$ м/ч, $B_{н} < B_{в} + M$. Исследования по определению диффузионного

Механические свойства основного металла (ОМ) и сварных соединений (СС) стали N-A-XTRA-70, выполненных дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сваркой проволокой Union NiMoCr диаметром 1 мм в смеси Ar + CO₂

Объект исследования	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5	ψ	KCV, Дж/см ² при T, °C					
					Шов			ЗТВ		
					20	-20	-40	20	-20	-40
ОМ	790	850	18,3	66,0	He опр.	He опр.	50	He опр.	He опр.	He опр.
СС (дуговая сварка, $v_{св} = 18$ м/ч)	731,1	817,1	19,5	65,0	181,6	-	109,2	217,9	-	218,0
СС (дуговая сварка, $v_{св} = 30$ м/ч)	777,7	871,0	19,7	63,2	145,7	-	81,6	232,7	-	223,1
СС (дуговая сварка, $v_{св} = 40$ м/ч)	826,7	915,0	18,4	60,9	140,3	-	91,3	246,3	-	212,3
СС (дуговая сварка, $v_{св} = 50$ м/ч)	822,0	905,0	18,8	64,5	138,9	-	93,7	242,6	-	213,5
СС (лазерная сварка, $v_{св} = 40$ м/ч)	1043,9	1227,7	6,0	24,9	He опр.	15,5	8,7	90,6	84,0	59,2
СС (лазерная сварка, $v_{св} = 50$ м/ч)	854,5	1050,8	10	42,4	52,5	13,8	7,3	-	-	-
СС (гибридная сварка, $v_{св} = 72$ м/ч)	961,0	1196,0	6,2	28,0	113,0	83,4	59,1	102,5	102,3	76,8
СС (гибридная сварка, $v_{св} = 90$ м/ч)	1082,0	1259,0	9,3	33,3	113,1	-	72,5	94,3	-	72,6

водорода в наплавленном металле при дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварке выполняли с помощью хроматографического метода. Образцы размером 25×15×15 мм с наплавленным и расплавленным металлом охлаждали в жидком азоте, а затем размещали в камере хроматографа для анализа содержания выделяемого водорода. В связи с тем, что лазерную сварку проводили без присадочной проволоки отнести количество водорода, которое выделяется, к весу наплавленного металла не представляется возможным. С учетом этого, содержание диффузионного водорода в металле определяли по количеству его в расплавленном металле и сравнивали с количеством водорода, который находился в наплавленном металле образцов, выполненных с использованием дуговой и гибридной лазерно-дуговой сварки.

Полученные результаты исследований свидетельствуют, что при указанных условиях и способах сварки в наплавленном металле образцов, выполненных дуговым и гибридным лазерно-дуговым способами, наблюдаются ультрамикроскопические концентрации содержания диффузионного водорода, а именно: 0,2...0,3 и 0,4 мл/100 г соответственно. При лазерной сварке содержание диффузионного водорода в расплавленном металле еще ниже и составляет 0,07 мл/100 г.

В заключение следует отметить, что сравнительная оценка свойств стыковых сварных соединений стали N-A-XTRA-70, выполненных дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сваркой проволокой Union NiMoCr диаметром 1 мм в смеси Ar + CO₂ показала, что гибридная лазерно-дуговая сварка позволяет обеспечить достаточно высокий уровень механических свойств сварных соединений, низкое содержание диффу-

зионного водорода в металле швов с точки зрения обеспечения высокой стойкости против образования холодных трещин.

1. Мусяченко В. Ф. Основы металлургии и технологии сварки высокопрочных низколегированных сталей: (Курс лекций для специалистов-сварщиков) / В. Ф. Мусяченко: Междунар. семинар-практикум ООН по сварке. – К.: Наук. думка, 1976. – 52 с.
2. Мусяченко В. Ф. Дуговая сварка высокопрочных легированных сталей / В. Ф. Мусяченко, Л. И. Миходуй. – М.: Машиностроение, 1987. – 80 с.
3. Походня И. К. Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных конструкционных сталей / И. К. Походня, В. И. Швачко // Автоматическая сварка. – 1997. – № 5. – С. 3–10.
4. Структура и свойства соединений высокопрочной стали в условиях внешнего статического нагружения / Л.И. Маркашова, В.Д. Позняков, Е.Н. Бердникова [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. – Вып. 73. – Днепропетровск: ПГАСА, 2014. – С. 213–219.
5. Moore P. L. Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels / P. L. Moore, D. S. Howse, E. R. Wallach // Science and Technology of Welding and Joining. – 2004. – Vol. 9, Is. 4. – P. 314–322.
6. Ках П. Особенности применения гибридной лазерной-дуговой сварки / П. Ках, А. Салминен, Дж. Мартикаинен // Автоматическая сварка. – 2010. – № 6. – С. 38–47.
7. Hybrid laser/arc welding of advanced higt strength steel in different butt joint configurations / M. Atabaki, J. Ma, G. Yang [et al.] // Materials and Design. – 2014. – 64. – P. 573–587.
8. Перспективы применения лазерной и гибридной сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. В. Бернадский [и др.]. // Автоматическая сварка. – 2010. – № 10. – С. 37–40.
9. Microstructure and mechanical properties of laser-MAG hybrid welded thick-section weathered steel joint / X. Y. Gu, Z. Z. Duan, X. P. Gu [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81, Iss. 5. – P. 825–831.
10. Grigoryants A. G. Special features of laser welding using fibre and CO2 lasers / A. G. Grigoryants, V. A. Grezev // Welding International. – 2015. – Vol. 29, Is. 12. – P. 968–973.

Поступила в редакцию 25.03.2016