

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОГО, ЛАЗЕРНОГО И ГИБРИДНОГО СПОСОБОВ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ S460M

В. Д. ПОЗНЯКОВ, В. Д. ШЕЛЯГИН, С. Л. ЖДАНОВ, А. В. БЕРНАЦКИЙ, А. А. МАКСИМЕНКО, А. В. СИОРА
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе изучено влияние параметров дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки на формирование структуры и свойств металла швов и зоны термического влияния стыковых сварных соединений высокопрочной легированной стали S460M с пределом текучести до 480 МПа. Показано, что увеличение скорости дуговой сварки в защитных газах до 50 м/ч (13,9 мм/с) позволяет получить качественный шов с повышенными показателями статической прочности и ударной вязкости. При лазерной сварке с повышением скорости охлаждения снижаются показатели пластичности и ударной вязкости металла шва, что связано с образованием мартенситной закалочной структуры металла шва и зоны термического влияния сварных соединений, которая появляется при более высокой скорости охлаждения. Применение способа гибридной лазерно-дуговой сварки стали S460M позволяет снизить скорость охлаждения металла швов и зоны термического влияния по сравнению с лазерным способом сварки, благодаря чему обеспечивается высокий уровень механических свойств и ударной вязкости металла этих зон. Библиогр. 16, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: стыковые соединения, высокопрочная сталь, дуговая сварка, лазерная сварка, гибридная лазерно-дуговая сварка, термический цикл, особенности структуры, механические свойства

При изготовлении металлических конструкций из высокопрочных сталей [1] толщиной до 10 мм широко применяется механизированная и автоматическая дуговая сварка в среде активных защитных газов, а также в их смесях с инертными газами ($Ar + CO_2$, $Ar + CO_2 + O_2$) [2], как проволокой сплошного сечения, так и порошковой проволокой [3]. Предпочтительными, с точки зрения получения качественных сварных соединений, являются такие режимы дуговой сварки, при которых металл шва и зоны термического влияния (ЗТВ) сохраняет прочность, пластичность и хладостойкость на уровне основного металла и имеет высокую сопротивляемость образованию холодных трещин [4].

В последние годы с целью уменьшения деформации и повышения качества сварных тонкостенных (толщиной до 10 мм) металлических конструкций из низколегированных сталей ферритно-перлитного класса при их изготовлении внедряется лазерная [5, 6] и гибридная лазерно-дуговая сварка [7–16]. Преимуществами этих видов сварки являются [5–16]: повышение производительности за счет увеличения в несколько раз скорости сварки [7]; значительное снижение погонной энергии [8, 9]; получение равновесных мелкозернистых микроструктур в металле шва и ЗТВ [10–12], которые повышают прочность соединений, уменьшают уровень остаточных напряжений и снижают склонность к образованию трещин [13–15].

В связи с этим актуальными являются исследования влияния параметров технологических процессов лазерной, дуговой и гибридной лазерно-дуговой сварки на структуру и свойства стыковых сварных соединений низколегированных сталей класса прочности S440...S490.

В настоящей работе изучалось влияние параметров дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки на формирование структуры, а также свойства металла шва и ЗТВ соединений высокопрочной легированной стали S460M с пределом текучести $\sigma_T = 480$ МПа следующего химического состава, мас. %: 0,15 C; 0,23 Si; 1,3 Mn; 0,09 Cr; 0,02 Ni; 0,23 Mo; 0,1 V; 0,6 Cu; 0,013 S; 0,017 P.

На начальном этапе работы было изучено влияние параметров режимов перечисленных выше способов сварки на условия нагрева и охлаждения стыковых сварных соединений толщиной 8 мм.

Автоматическая дуговая сварка таких соединений осуществлялась порошковой проволокой Megafil 821R диаметром 1,2 мм в смеси газов (82 % Ar + 18 % CO_2) на следующих режимах: сварочный ток $I_{CB} = 220...240$ А; напряжение на дуге $U_d = 30...32$ В; скорость сварки: $v_{CB} = 30; 40; 50$ м/ч (8,3; 11,1 и 13,9 мм/с, соответственно). Дальнейшее повышение скорости сварки оказалось нецелесообразным, поскольку при выбранных режимах сварки не удавалось получить качественные соединения — ухудшилось формирование шва, на-

чали появляться непровары, увеличилось разбрызгивание электродного металла.

При лазерном процессе скорость сварки находилась в пределах от 40 м/ч (11,1 мм/с) до 50 м/ч (13,9 мм/с) ($w_{6/5}=65...103$ °C/с). Параметры лазерного излучения составляли: мощность Nd:YAG лазера — 4,4 кВт, заглубление фокуса $\Delta F = -1,5$ мм.

При гибридной лазерно-дуговой сварке режимы лазерной составляющей были: мощность Nd:YAG лазера — 4,4 кВт, заглубление фокуса $\Delta F = -1,5$ мм. Параметры дуговой составляющей гибридного процесса сварки при постоянном расходе защитной газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ $Q_{\text{защ}} = 14...16$ л/мин, изменялись в зависимости от скорости сварки. При скорости гибридной лазерно-дуговой сварки $v_{\text{св}} = 72$ м/ч (20,0 мм/с) ток и напряжение на дуге составляли: $I_{\text{св}} = 120$ А, $U_{\text{д}} = 22$ В; при скорости сварки $v_{\text{св}} = 90$ м/ч (25 мм/с) — $I_{\text{св}} = 170$ А, $U_{\text{д}} = 24$ В; при скорости сварки $v_{\text{св}} = 110$ м/ч (30,5 мм/с) — $I_{\text{св}} = 200$ А.

Запись термических циклов сварки осуществлялась с помощью хромель-алюмелевых термопар диаметром 0,5 мм, подключенных через USB-преобразователь электрических сигналов к персональному компьютеру. Их спай располагали в месте, где находился участок перегрева металла ЗТВ. В качестве параметра термического цикла, который в дальнейшем был использован как критерий для оценки его влияния на структуру и механические свойства металла шва и ЗТВ сварных соединений, была принята скорость охлаждения металла ЗТВ в интервале температур 600...500 °C ($w_{6/5}$).

Анализ термических циклов автоматической дуговой сварки стыковых соединений стали S460M показал, что скорость нагрева таких соединений практически не зависит от скорости перемещения источника нагрева – сварочной дуги и составляет 180...200 °C/с. Существенное влияние скорость сварки оказывает на интенсивность охлаждения металла ЗТВ (рис. 1). С повышением

$v_{\text{св}}$ скорость охлаждения сварных соединений увеличивается. Так, охлаждение металла участка перегрева ЗТВ в интервале температур 600...500 °C при скорости сварки $v_{\text{св}} = 30$ м/ч (8,3 мм/с) происходит со скоростью $w_{6/5} = 24$ °C/с, при $v_{\text{св}} = 40$ м/ч (11,1 мм/с) $w_{6/5} = 27$ °C/с, а при скорости дуговой сварки $v_{\text{св}} = 50$ м/ч (13,9 мм/с) металл ЗТВ охлаждается со скоростью $w_{6/5} = 36$ °C/с.

Анализ термических циклов лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки стыковых соединений стали S460M показал, что значения скоростей нагрева металла ЗТВ до температур 1100...1300 °C и скоростей охлаждения участков перегрева в интервале температур 600...500 °C идентичны значениям, полученным для стали 14ХГН2МДАФБ [13].

С точки зрения структурообразования лазерный процесс сварки характеризуется «жестким» термическим циклом с достаточно высокими (до $w_{6/5} = 103$ °C/с) скоростями охлаждения в металле ЗТВ сварных соединений стали S460M, что может привести к образованию в нем закалочных структур с высокой твердостью. Об этом свидетельствуют результаты исследований структурных превращений в металле ЗТВ стали S460M в процессе нагрева — охлаждения, полученные с использованием дилатометрии [16]. Для «смягчения» такого термического цикла целесообразно использовать гибридную лазерно-дуговую сварку, которая позволяет при сохранении производительности процесса обеспечивать охлаждение металла ЗТВ сварных соединений со скоростью $w_{6/5} = 58...62$ °C/с.

Различия в условиях охлаждения при дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварке, обуславливают формирование различной структуры, что, в свою очередь, приводит к изменению механических свойств металла шва и ЗТВ сварных соединений. Об этом свидетельствуют результаты приведенных ниже исследований.

По данным металлографического анализа установлено, что микроструктура металла ЗТВ образцов стали S460M, выполненных дуговой сваркой, может изменяться от ферритной до бейнитной. При увеличении скорости охлаждения от $w_{6/5} = 24$ °C/с ($v_{\text{св}} = 30$ м/ч, рис. 2, а) до $w_{6/5} = 27$ °C/с ($v_{\text{св}} = 40$ м/ч, рис. 2, б) и $w_{6/5} = 36$ °C/с ($v_{\text{св}} = 50$ м/ч, рис. 2, в) она трансформируется из игольчатого феррита в бейнитную и состоит из разнонаправленных пакетов бейнита, содержащих остаточный аустенит. При этом возрастает значение интегральной микротвердости в металле ЗТВ образцов стали S460M (от HV0,1 — 2490...2730 МПа при $v_{\text{св}} = 30$ м/ч до HV0,1 — 3530...3650 МПа при $v_{\text{св}} = 50$ м/ч, соответственно).

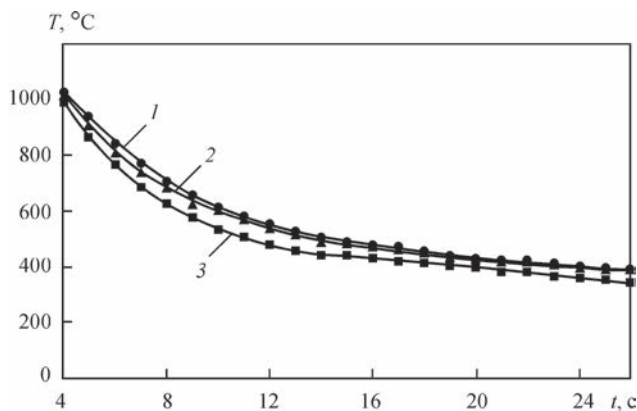


Рис. 1 Термические циклы при автоматической дуговой сварке стали S460M: 1 — $v_{\text{св}} = 30$ м/ч ($w_{6/5} = 24$ °C/с); 2 — 40 м/ч (27 °C/с); 3 — 50 м/ч (36 °C/с)

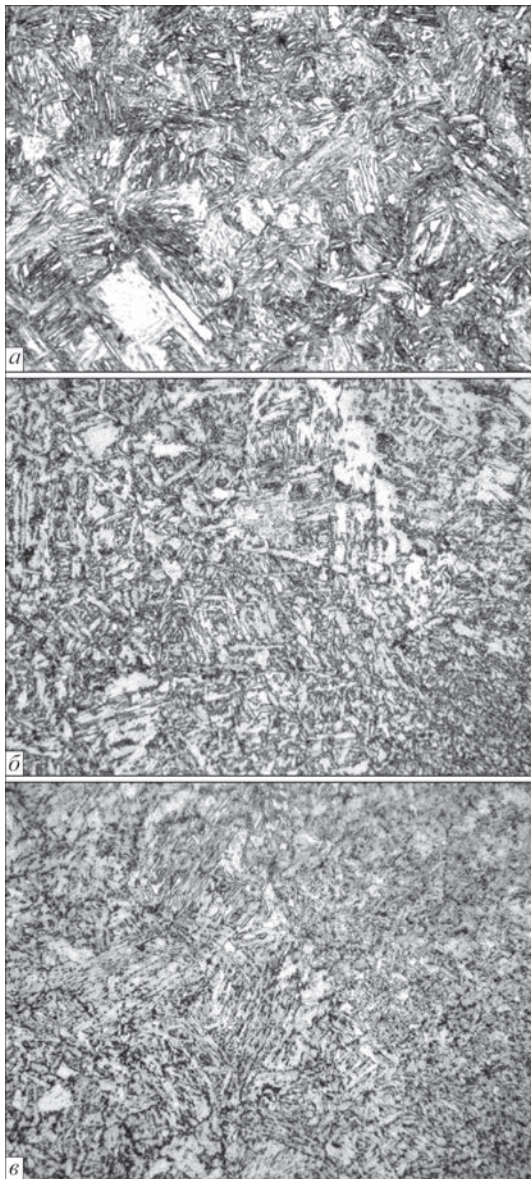


Рис. 2. Микроструктура ($\times 500$) металла ЗТВ сварных соединений стали S460M, полученных при различной скорости дуговой сварки: *a* — $v_{св} = 30$ м/ч (8,3 мм/с) ($w_{6/5} = 24$ °C/с); *б* — 40 м/ч (11,1 мм/с) ($w_{6/5} = 27$ °C/с); *в* — 50 м/ч (13,9 мм/с) (36 °C/с)

Для скоростей охлаждения $w_{6/5}$ образцов около 60 °C/с, характерных для гибридной лазерно-дуговой сварки, в металле ЗТВ сварных соединений стали S460M наблюдается трансформация структуры из бейнитной в мартенситную (рис. 3). Для этой скорости охлаждения характерна игольчатая мартенситная структура с разнонаправленными иглами под углом 60 и 120°. Структура металла ЗТВ содержит темно- и светлотравящийся мартенсит. В данном случае микротвердость светлотравящегося мартенсита составляет $HV0,1$ — 3600...3760 МПа, а светлотравящегося — $HV0,1$ — 3860...4260 МПа.

С увеличением скорости охлаждения свыше 100 °C/с (характерной для лазерной сварки со скоростью $v_{св} = 50$ м/ч) в металле ЗТВ сварных соедине-

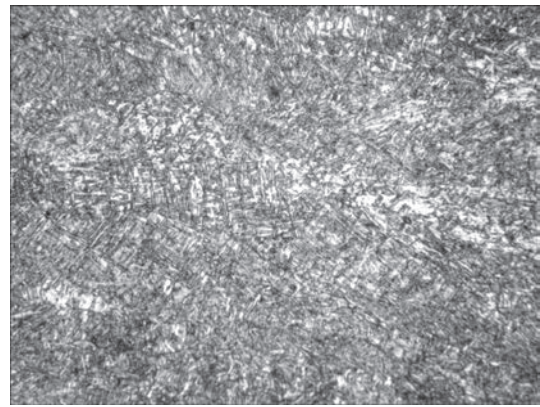


Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) металла ЗТВ при гибридной лазерно-дуговой сварке стали S460M ($v_{св}$ примерно 90 м/ч (25,0 мм/с))

ний стали S460M также формируется мартенсит. Но при таких условиях охлаждения структура мартенсита состоит из более плотноупакованных пакетов, что приводит к дальнейшему росту значений микротвердости до $HV0,1$ — 4100...4630 МПа.

Для оценки механических свойств из сварных соединений изготавливали образцы согласно ГОСТ 6996-66 для испытаний на статическое растяжение (тип I) и на ударный изгиб с острым надрезом (тип X) как по металлу шва, так и по металлу ЗТВ. Образцы на растяжение испытывали при комнатной температуре, а на ударный изгиб при температурах от 20 до -40 °C.

Результаты исследований механических свойств сварных соединений, выполненных с использованием дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки, приведены в таблице.

Установлено, что с повышением скорости дуговой сварки от 30 м/ч ($w_{6/5} = 24$ °C/с) до 50 м/ч ($w_{6/5} = 36$ °C/с) значения предела текучести и предела прочности металла швов несколько возрастают от 582 до 607 МПа и от 625 до 657 МПа, соответственно. Ударная вязкость металла шва и ЗТВ сварных соединений при этом также увеличивается. Наиболее существенное увеличение показателей KCV наблюдается в образцах, которые испытывались при температуре -40 °C. В частности, с повышением $w_{6/5}$ от 24 ($v_{св} = 30$ м/ч) до 36 °C/с ($v_{св} = 50$ м/ч) значения KCV_{-40} металла шва увеличиваются от 70...83 до 137...161 Дж/см², а ЗТВ от 80...110 до 115...120 Дж/см². Пластичность металла шва таких соединений, независимо от выбранных условий сварки, практически не изменяется и находится на высоком уровне (относительное удлинение 21...23 %, а относительное сужение 68...70 %).

Результаты механических испытаний цилиндрических образцов на разрыв показали, что по сравнению со сварными соединениями, выполненными дуговой сваркой, предел текучести и временное сопротивление разрыву металла шва

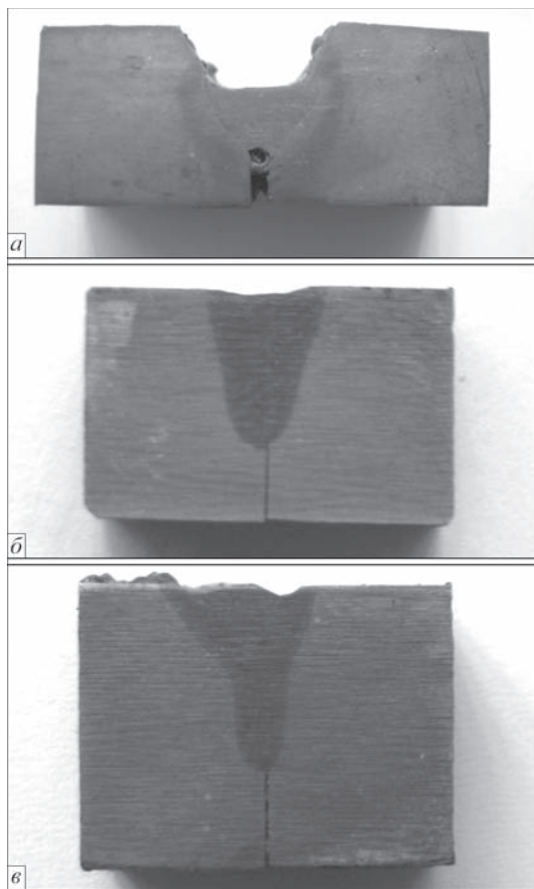


Рис. 4. Макрошлифы из жестких стыковых технологических проб стали S460M толщиной 8 мм ($B = 100$ мм): *a* — при автоматической дуговой сварке в смеси газов Ar + 18 % CO₂ порошковой проволокой Megafil 821R ($v_{св} = 30$ м/ч (8,3 мм/с)); *б* — лазерной сварке без присадочного материала ($v_{св} = 40$ м/ч (11,1 мм/с)); *в* — при гибридной лазерно-дуговой сварке указанной выше порошковой проволокой ($v_{св} = 72$ м/ч (20,0 мм/с))

сварных соединений стали S460M, выполненных с использованием лазерного процесса, увеличиваются практически в два раза. Однако при этом существенно снижается его пластичность: в два раза при скорости сварки 40 м/ч и практически в четыре раза при $v_{св} = 50$ м/ч. Ударная вязкость металла шва таких соединений вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сварным соединениям из сталей с $\sigma_{0,2} \geq 390$ МПа ($KCV_{-40} \geq 34$ Дж/см²). В то же время отмечено, что с увеличением скорости лазерной сварки показатели ударной вязкости металла шва сварных соединений стали S460M снижаются как при положительных, так и при отрицательных температурах. Ударная вязкость металла ЗТВ таких соединений находится на высоком уровне ($KCV_{40} = 120...150$ Дж/см²), а ее значения в исследованном диапазоне скоростей сварки практически не изменяются.

При гибридной лазерно-дуговой сварке стали S460M наблюдается такая же тенденция изменения механических свойств металла шва, как и при лазерной сварке. Статическая прочность металла шва сварных соединений стали S460M увеличива-

ется по сравнению с дуговой сваркой на 65...70 %, однако его пластичность уменьшается практически в два раза.

Повышение скорости гибридной лазерно-дуговой сварки до 110 м/ч ($w_{6/5} = 58...63$ °C/с) приводит к снижению показателей прочности на 100 МПа и незначительному (на 15 %) повышению показателей пластичности (таблица). С повышением скорости гибридной лазерно-дуговой сварки от 72 (20,0 мм/с) до 110 м/ч (30,5 мм/с) ($w_{6/5} = 58...63$ °C/с) ударная вязкость металла шва при всех температурах испытаний уменьшается (KCV_{20} от 189 до 102 Дж/см², KCV_{-20} от 170 до 75 Дж/см² и KCV_{-40} от 118 до 63 Дж/см²).

Сопrotивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях стали S460M, выполненных с использованием дугового, лазерного и гибридного лазерно-дугового процессов сварки, оценивали с использованием технологической пробы «жесткая обварка» [13]. Контрольное сварное соединение имело ширину $B = 100$ мм, что соответствовало наибольшей жесткости закрепленных на плите пластин. В результате таких исследований установлено, что сварные соединения стали S460M, выполненные с использованием дугового, лазерного и гибридного лазерно-дугового процессов не склонны к образованию холодных трещин. Данный вывод был сделан на основании результатов анализа макрошлифов, изготовленных из технологических проб рис. 4, *a–в*. Он показал, что даже при сварке без предварительного подогрева холодные трещины в соединениях отсутствуют.

Кроме холодных трещин в сварном соединении могут встречаться и другие дефекты, такие как несплавления, поры, подрезы, шлаковые включения и т. п. При статической и циклической нагрузке они могут играть роль очага зарождения и развития трещин, которые при эксплуатации (особенно в условиях отрицательных температур) могут привести к хрупкому разрушению металла. Поэтому дальнейшая работа была направлена на оценку сопротивляемости металла шва и ЗТВ сварных соединений стали S460M хрупкому разрушению. Эти исследования проводились с использованием критериев механики разрушения. Для этих целей с использованием дугового процесса были сварены двухсторонние однопроходные соединения стали S460M толщиной 10 мм с разделкой кромок, а с использованием гибридного лазерно-дугового процесса без разделки кромок. Дугую сварку таких соединений выполняли на скорости 30 м/ч, а гибридную лазерно-дугую на скорости 72 м/ч. Остальные технологические параметры режимов сварки указаны выше. Из указанных сварных соединений были изготовлены

Механические свойства сварных соединений стали S460M при дуговой, лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварке

Вариант сварки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV, Дж/см ² при T, °C					
					Шов			ЗТВ		
					20	-20	-40	20	-20	-40
Основной материал	490	600	24	59	110*					
Дуговая, $v_{св} = 30$ м/ч (8,3 мм/с)	576,3 587,3	623,6 626,3	22,3 23,3	69,7 68,0	186,0 172,1	121,7 153,7	69,8 83,4 80,9	-	-	83,3 109,4 90,7
Дуговая, $v_{св} = 40$ м/ч (11,1 мм/с)	586,0 608,9	629,6 637,7	21,7 23,3	69,8 69,9	176,2 173,9	158,3 134,8	93,3 80,1 113,9	-	-	107,1 73,6 88,6
Дуговая, $v_{св} = 50$ м/ч (13,9 мм/с)	606,4 608,3	658,1 656,7	21,0 23,0	68,0 69,9	174,8 185,7	149,0 167,9	161,1 145,2 136,9	-	-	120,8 120,2 115,2
Лазерная, $v_{св} = 40$ м/ч (11,1 мм/с)	998,8 996,0 997,4	1172,2 1151,4 1161,8	10,0 11,3	24,9 41,2	175,1 202,3	163,7 232,1 112,3	109,4 113,2 132,7	100,8 207,0	-	130,5 116,9 148,6
Лазерная, $v_{св} = 50$ м/ч (13,9 мм/с)	964,6 923,3 907,7	1123,1 1130,0 1068,3	5,3 6,7 4,0	19,5 19,5 18,5	154,2 87,6	57,2 85,2 54,2	46,0 102,5 42,3	150,0	-	167,5 132,1 157,2
Гибридная, $v_{св} = 72$ м/ч (20,0 мм/с)	861,3 795,1	1047,3 971,5	11,3 8,0	34,0 36,4	116,5 103,2	123,1 103,4 103,4	67,6 101,5 96,5	33,8 106,6 58,3	-	45,0 42,1 40,8
Гибридная, $v_{св} = 90$ м/ч (25,0 мм/с)	826,8 800,9	1033,5 1019,9	12,0 9,4	41,6 41,8	109,5 125,7	92,4 71,0 111,2	79,3 76,8 60,5	92,5 119,9 136,3	-	67,5 85,7 96,8
Гибридная, $v_{св} = 110$ м/ч (30,5 мм/с)	745,1 638,1	941,9 894,7	13,3 12,9	46,2 46,4	58,9 77,4	39,7 58,4 55,7	57,3 44,4 60,8	114,9 128,2 121,5	123,9 125,7 124,8	46,9 59,1 101,6

*Данные основного металла поперек проката

образцы сечением 20×10 мм для испытаний на трехточечный изгиб. Шевронный надрез на образцы наносился таким образом, чтобы устье выращенной от его вершины трещины находилось и в металле шва (часть образцов) и на линии сплавления соединения (другая часть образцов). Испытание образцов осуществляли при температурах -40, -20 °C и 20 °C. По результатам испытаний определяли критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} и критическое раскрытие трещины δ_C .

Анализ результатов выполненных исследований позволил установить следующее. Более высокой сопротивляемостью хрупкому разрушению отличаются сварные соединения стали S460M, выполненные дуговой сваркой. При температурах испытаний -40, -20 и 20 °C средние значения K_{IC} металла шва таких соединений составляют 86,3; 96,8 и 101 МПа√м, соответственно (рис. 5, а). По мере увеличения температуры испытаний показатели δ_C металла шва также увеличиваются от 0,08 и 0,09 мм при температурах -40 и -20 °C, соответственно, до 0,12 мм при температуре испытаний 20 °C (рис. 5, б).

Высокие, но существенно ниже по сравнению со швом, выполненным дуговой сваркой, показатели K_{IC} характерны для швов сварных соединений, изготовленных с использованием гибридной лазерно-дуговой сварки. По мере увеличения тем-

пературы испытания образцов, подготовленных из таких соединений, средние показатели K_{IC} увеличиваются от 52,2 МПа√м (температура испытаний

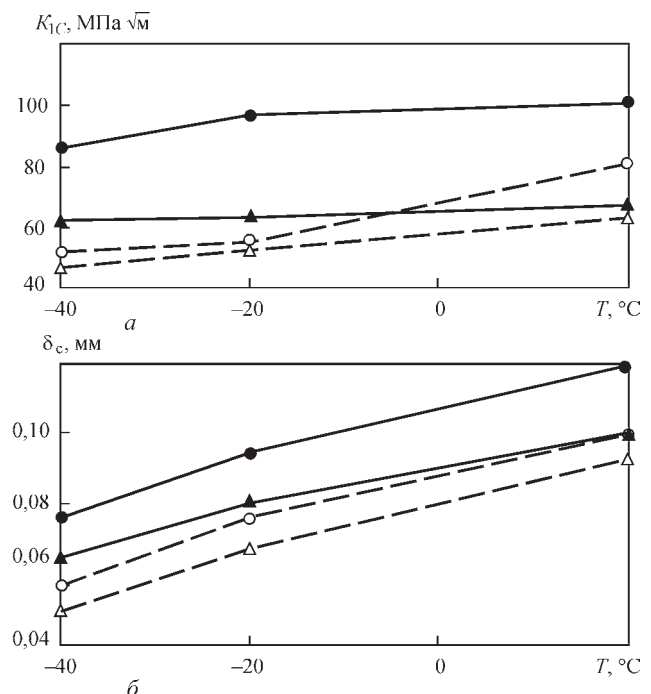


Рис. 5. Зависимость значений критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} (а) и критического раскрытия трещины δ_C (б) от температуры испытаний для металла швов (●, ○) и металла ЗТВ (▲, △) сварных соединений стали S460M $\delta = 8$ мм при дуговой автоматической (●, ▲) и гибридной лазерно-дуговой сварке (○, △)

–40 °С) до 55,4 и 81,2 МПа√м при температурах испытаний –20 и 20 °С, соответственно (рис. 5, а). Аналогичным образом изменяются и показатели δ_C металла шва от 0,067 мм и 0,076 мм при температурах –40, и –20 °С, соответственно, до 0,1 мм при температуре испытаний 20 °С (рис. 5, б).

Что касается металла ЗТВ сварных соединений исследуемой стали, то можно отметить следующее. При температуре испытаний 20 °С, значения показателей K_{1C} и δ_C металла ЗТВ сварных соединений, выполненных как дуговой, так и гибридной лазерно-дуговой сваркой, близки и соответственно составляют 65,6 МПа√м и 0,095 мм. В условиях испытаний при отрицательных температурах величины K_{1C} и δ_C металла ЗТВ сварных соединений, выполненных с использованием гибридной лазерно-дуговой сварки, на 22...32 % меньше, чем в сварных соединениях, изготовленных с применением дуговой сварки. Так, при температуре испытаний –20 °С показатели K_{1C} и δ_C металла ЗТВ сварных соединений, выполненных гибридной лазерно-дуговой сваркой, составляют 52,6 МПа√м и 0,057 мм, а дуговой сваркой — 63,3 МПа√м и 0,076 мм. При температуре испытаний образцов –40 °С показатели K_{1C} и δ_C металла ЗТВ составляют: $K_{1C} = 46,7$ МПа√м, $\delta_C = 0,05$ мм у сварных соединений, выполненных гибридной лазерно-дуговой сваркой, и 62,1 МПа√м, $\delta_C = 0,065$ мм, выполненных дуговой сваркой (рис. 5, а, б).

Отличаются сварные соединения стали S460M, выполненные с использованием дуговой и гибридной лазерно-дуговой сварки, по сопротивляемости образованию трещин усталости. Об этом свидетельствуют результаты испытаний образцов на циклический консольный изгиб. Такие испытания проводились применительно к образцам размером 400×120×10 мм, изготовленным из стыковых соединений, дуговая и гибридная лазерно-дуговая сварка которых осуществлялась в защитной газовой смеси 82 % Ar+18 % CO₂ проволокой Megafil 821R диаметром 1, мм на режимах, аналогичных режимам, на которых выполнялись соединения для испытаний на хрупкое разрушение. Испытания образцов при симметричном циклическом нагружении проводили с частотой цикла 14 Гц. Напряжение цикла изменялось от 40 до 80 МПа с шагом 20 МПа. В результате проведенных исследований установлено, что более высокую стойкость к образованию трещин усталости имеют сварные соединения, выполненные дуговой сваркой. При указанных условиях нагружения образование усталостных трещин в сварных соединениях, выполненных с использованием дуговой сварки, не наблюдалось после $N = 2 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Трещины усталости глубиной 3 мм были выявлены только

в сварных соединениях, выполненных с использованием гибридного лазерно-дугового процесса при напряжениях цикла 60 и 80 МПа. Так, в образцах, которые испытывались при напряжении цикла 60 МПа, они начали образовываться после 1540400 циклов нагружения, а при $\sigma = 80$ МПа — после $N = 1300680$ циклов нагружения.

Выводы

Увеличение скорости дуговой сварки в защитных газах до $v_{св} = 50$ м/ч (13,9 мм/с) ($w_{6/5} = 36$ °С/с) позволяет получить качественный шов в сварных соединениях высокопрочной легированной стали S460M с пределом текучести $\sigma_T = 480$ МПа с повышенными показателями статической прочности и ударной вязкости.

При лазерной сварке с повышением скорости охлаждения $w_{6/5}$ сварных соединений стали S460M снижаются показатели пластичности и ударной вязкости металла шва. Это связано с образованием мартенситной закалочной структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений, которая образуется в результате характерного для лазерной сварки интенсивного охлаждения металла в интервале температур 600...500 °С ($w_{6/5} = 65...103$ °С/с).

Применение гибридной лазерно-дуговой сварки стали S460M позволяет существенно повысить линейную скорость сварки по сравнению с дуговым и лазерным процессами. При этом обеспечивается снижение скорости охлаждения металла швов и ЗТВ по сравнению с лазерным способом сварки. В совокупности это позволяет существенно повысить производительность процесса сварки и сохранить при этом показатели механических свойств и ударной вязкости металла швов и ЗТВ сварных соединений на уровне требований, предъявляемых к сварным конструкциям, изготавливаемым из сталей класса прочности С440...С490.

Установлено, что сварные соединения стали S460M, выполненные с использованием дугового, лазерного и гибридного лазерно-дугового процессов, не склонны к образованию холодных трещин.

Повысить показатели вязкости разрушения соединений при гибридной лазерно-дуговой сварке возможно за счет формирования в металле ЗТВ структуры нижнего бейнита, что достигается при скорости сварки 72 м/ч.

Показано, что более высокую долговечность имеют стыковые соединения стали S460M, выполненные дуговым способом сварки. При гибридной лазерно-дуговой сварке повысить сопротивляемость усталостному разрушению можно при условии выполнения в соединениях разделки кромок с небольшим углом раскрытия до 10°.

Список литературы

1. Одесский П. Д., Молодцов А. Ф., Морозов Ю. Д. (2011) Новые эффективные низколегированные стали для специальных металлических конструкций. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, **5**, 20–25.
2. Бильк А. С., Курашев Р. В., Горбатенко В. В., Коновалов Г. Н. (2013) Применение термомеханически упрочненного листового проката в сварных металлических конструкциях. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, **4**, 2–5.
3. Позняков В. Д., Жданов С. Л., Завдоев А. В. и др. (2016) Свариваемость высокопрочной микролегированной стали S460M. *Автоматическая сварка*, **1**, 23–30.
4. Ufuah E. (2013) Elevated temperature mechanical properties of butt welded connections made with high strength steel grades S355 and S460M. Design, Fabrication and Economy of Metal Structures. *International Conference Proceedings, Miskolc, Hungary, April 24–26*, 407–412.
5. Grigoryants A. G., Grezev V. A. (2015) Special features of laser welding using fibre and CO₂ lasers. *Welding International*, **29**, **1**, 968–973.
6. Markovits T., Takács J. (2010) Edge welding of laminated steel structure by pulsed Nd:YAG laser. *Physics Procedia*, **5**, Pt B, 47–52.
7. Moore P. L., Howse D. S., Wallach E. R. (2004) Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, **9**, **4**, 314–322.
8. Ках П., Салминен А., Мартикаинен Дж. (2010) Особенности применения гибридной лазерной-дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, **6**, 38–47.
9. Atabak M., Ma J., Yang G., Kovacevic R. (2014) Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations. *Materials and Design*, **64**, 573–587.
10. Gu X. Y., Duan Z. Z., Gu X. P. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties of laser-MAG hybrid welded thick-section weathered steel joint. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **81**, **5**, 825–831.
11. Cao X., Wanjara P., Huang J. et al. (2011) Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high strength low alloy steel. *Materials & Design*, **32**, **6**, 3399–3413.
12. Kelly S. M., Brown S. W., Tressler J. F. et al. (2009) Using Hybrid Laser-Arc Welding to Reduce Distortion in Ship Panels. *Welding Journal*, **88**(3), P. 32–36.
13. Позняков В. Д., Шелягин В. Д., Жданов С. Л. и др. (2015) Лазерно-дуговая сварка высокопрочных сталей с пределом текучести более 700 МПа. *Автоматическая сварка*, **10**, 20–25.
14. Berdnikova O., Poznyakov V., Bushma O. (2016) Laser and Hybrid Laser-Arc Welding of High Strength Steel N-A-XTRA-70. *Materials Science Forum*, **870**, P.630–635.
15. Berdnikova O., Sydoretz V., Alekseienco T. (2014) Structure and Properties of Laser-Welded Joints from High-Strength Steels. *Applied Mechanics and Materials*, **682**, 240–245.
16. Григоренко Г. М., Позняков В. Д., Зубер Т. А., Костин В. А. (2017) Особенности формирования структуры сварных соединений микролегированной конструкционной стали S460M. *Автоматическая сварка*, **10**, 9–16.

References

1. Odessky, P.D., Molodtsov, A.F., Morozov, Yu.D. (2011) New effective low-alloy steels for building metallic structures. *Montazhnye i Spetsialnye Raboty v Stroitelstve*, **5**, 20-25 [in Russian].
2. Bilyk, A.S., Kurashev, R.V., Gorbatenko, V.V. et al. (2013) Application of thermomechanically hardened rolled sheet in welded metallic structures. *Promyslove Budivnytstvo ta Inzhenerni Sporudy*, **4**, 2-5 [in Russian].
3. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Zavdoveev, A.V. et al. (2016) Weldability of high-strength microalloyed steel S460M. *The Paton Welding J.*, **1**, 21-28.
4. Ufuah, E. (2013) Elevated temperature mechanical properties of butt welded connections made with high-strength steel grades S355 and S460M. In: *Proc. of Int. Conf. on Design,*

- Fabrication and Economy of Metal Structures (Miskolc, Hungary, April 24-26, 2013)*, 407-412.
5. Grigoryants, A.G., Grezev, V.A. (2015) Special features of laser welding using fibre and CO₂ lasers. *Welding Intern.*, **29**(**1**), 968-973.
6. Markovits, T., Takacs, J. (2010) Edge welding of laminated steel structure by pulsed Nd:YAG laser. *Physics Procedia*, **5**, Pt B, 47-52.
7. Moore, P.L., Howse, D.S., Wallach, E.R. (2004) Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels. *Sci. and Technology of Welding and Joining*, **9**(**4**), 314-322.
8. Kah, P., Salminen, A., Martikainen, J. (2010) Laser-arc hybrid welding processes (Review). *The Paton Welding J.*, **6**, 32-40.
9. Atabak, M., Ma, J., Yang, G., Kovacevic, R. (2014) Hybrid laser/arc welding of advanced high-strength steel in different butt joint configurations. *Materials & Design*, **64**, 573-587.
10. Gu, X.Y., Duan, Z.Z., Gu, X.P. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties of laser-MAG hybrid welded thick-section weathered steel joint. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **81**(**5**), 825-831.
11. Cao, X., Wanjara, P., Huang, J. et al. (2011) Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high-strength low-alloy steel. *Materials & Design*, **32**(**6**), 3399-3413.
12. Kelly, S.M., Brown, S.W., Tressler, J.F. et al. (2009) Using hybrid laser-arc welding to reduce distortion in ship panels. *Welding J.*, **88**(**3**), 32-36.
13. Poznyakov, V.D., Shelyagin, V.D., Zhdanov, S.L. et al. (2015) Laser-arc welding of high-strength steels with yield strength of more than 700 MPa. *The Paton Welding J.*, **10**, 19-24.
14. Berdnikova, O., Poznyakov, V., Bushma, O. (2016) Laser and hybrid laser-arc welding of high strength-steel N-A-XTRA-70. *Mat. Sci. Forum*, **870**, 630-635.
15. Berdnikova, O., Sydoretz, V., Alekseienco, T. (2014) Structure and properties of laser-welded joints from high-strength steels. *Appl. Mech. Mater.*, **682**, 240-245.
16. Grigorenko, G.M., Poznyakov, V.D., Zuber, T.A. et al. (2017) Peculiarities of formation of structure in welded joints of microalloyed structural steel S460M. *The Paton Welding J.*, **10**, 2-8.

В. Д. Позняков, В. Д. Шелягин, С. Л. Жданов,
А. В. Бернацкий, А. О. Максименко, О. В. Сиора

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДУГОВОГО, ЛАЗЕРНОГО
ТА ГІБРИДНОГО СПОСОБІВ
ЗВАРЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ
СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ
ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ S460M

В роботі вивчено вплив параметрів дугового, лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання на формування структури і властивостей металу швів і зони термічного впливу стикових зварних з'єднань високоміцної легованої сталі S460M з межею текучості до 480 МПа. Показано, що збільшення швидкості дугового зварювання в захисних газах до 50 м/год (13,9 мм/с) дозволяє отримати якісний шов з підвищеними показниками статичної міцності і ударної в'язкості. При лазерному зварюванні з підвищенням швидкості охолодження знижуються показники пластичності і ударної в'язкості металу шва, що пов'язано з утворенням мартенситної гартівної структури в шві металів і зони термічного впливу зварних з'єднань, яка з'являється при більш високій швидкості охолодження. Застосування способу гібридного лазерно-дугового зварювання сталі S460M дозволяє знизити швид-

кість охолодження металу швів і зони термічного впливу в порівнянні з лазерним способом зварювання, завдяки чому забезпечується високий рівень механічних властивостей і ударної в'язкості металу цих зон. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: стикові з'єднання, високоміцна сталь, дугове зварювання, лазерне зварювання, гібридне лазерно-дугове зварювання, термічний цикл, особливості структури, механічні властивості

Effect of parameters of arc, laser and hybrid methods of welding on structure and properties of butt joints of high-strength steel S460M

V. D. Poznyakov, V. D. Shelyagin, S. L. Zhdanov,
A. V. Bernatskii, A. A. Maksymenko and A. V. Siora

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail:office@paton.kiev.ua

The paper studies the effect of parameters of arc, laser and hybrid laser-arc welding on formation of structure and properties of weld metal and heat affected zone of butt joints from high-strength low alloy steel S460M with yield limit up to 480 MPa. It is shown that increase of rate of gas-shielded arc welding to 50 m/h (13.9 mm/s) allows receiving a quality weld with increased indices of static strength and impact toughness. Laser welding with increased cooling rate provokes reduction of indices of ductility and impact toughness of weld metal that is related with formation of martensite hardening structure of weld metal and heat affect zone of the welded joints revealing at high cooling rate. Application of method of hybrid laser-arc welding of steel S460M allow decreasing cooling rate of weld metal and heat affected zone in comparison with laser welding method. This provides high level of mechanical properties and impact toughness of metal of these zones. 16 Ref. 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: butt joints, high-strength steel, arc welding, laser welding, hybrid laser-arc welding, thermal cycle, structure peculiarities, mechanical properties

Поступила в редакцию 27.11.2017



**Ярмарки «Проволока 2018» и Трубы 2018» —
больше, чем когда-либо!**

16-20 апреля 2018 г., Messe Düsseldorf,
г. Дюссельдорф, Германия

За четыре месяца до начала торговых ярмарок выставочный центр Дюссельдорфа получил многочисленные заявки на участие, больше, чем когда-либо ранее. Это связано с успешной историей этих ярмарок, продолжительность которой насчитывает более 30 лет.

Характерно, что на сегодня уже зарезервирована площадь в 120000 м², что на 10000 м² больше, чем площадь для двух торговых ярмарок в 2016 г.

Число зарегистрированных экспонентов для ярмарки «Проволока 2018» в настоящее время составляет 1180, они будут представлять 50 стран. Площадь ярмарки «Трубы 2018» составляет более 52000 м², на ней будут размещены 965 экспонентов из 53 стран.

Как и прежде, два события в Дюссельдорфе наглядно демонстрируют свои ведущие позиции среди мировых ярмарок в своих отраслях. Инновационные технологии, новые машины и оборудование, а также продукты и услуги из проволоочной, кабельной и трубной промышленности будут представлены в течение пяти дней.

На ярмарке «Проволока 2018» будут представлены машины для производства проволоки, инструменты и вспомогательные материалы для технологических процессов, а также материалы, специальные провода и кабели. Ярмарка также будет посвящена инновациям в области техники измерения и контроля, испытательной техники и целым рядом специализированных областей.

В 2018 г. будет уделено еще больше внимания, чем раньше, потенциалу технологии стекловолокон. Стекловолокно является более эффективным, скоростным и часто более надежным, чем обычные материалы. Таким образом, Messe Düsseldorf реагирует на все более широкое использование стекловолоконных технологий в энергетическом секторе, а также в строительной и коммуникационной отраслях применения.

Ярмарка «Трубы 2018» будет представлена в павильонах от 3 до 7,0, 7а, 16 и 17, а также частично во временном павильоне 18. В ассортименте представленных продуктов будут машины и оборудование для производства и обработки труб, а также сырьё и аксессуары, подержанные машины, технологические инструменты, вспомогательные ресурсы и измерительное, контрольное и испытательное оборудование. Кроме того, линейка оборудования будет включать трубопроводы, профили и пластиковые трубы.

Постоянный интерес со стороны Китая позволил снова создать китайский павильон. Китайские компании из проволоочной, кабельной и трубной промышленности будут совместно представлены в зале 16 под лозунгом «Знакомство с китайской экспертизой».

Актуальную информацию о двух торговых ярмарках можно найти на веб-сайтах: www.wire.de и www.tube.de

