



ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОДОГРЕВОМ КРОМОК

В. Ю. ХАСКИН, В. Д. ШЕЛЯГИН, В. П. ГАРАЩУК, В. Н. СИДОРЕЦ, кандидаты техн. наук,
А. В. САХАРНОВ, Е. И. ГОНЧАРЕНКО, инженеры (Ин-т электросварки ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано совместное воздействие на сталь лазерного излучения и высокочастотного подогрева при сварке стыковых соединений. Установлено, что сопутствующий высокочастотный подогрев до температуры на поверхности образца, равной 1100...1200 °С, позволяет примерно в 1,5 раза повысить либо глубину проплавления, либо скорость процесса. Геометрия сварных швов близка к типичной для лазерной сварки, но отлична по строению (отсутствуют характерные для лазерной сварки закалочные структуры в металле швов и ЗТВ, значения твердости в меньшей мере отличаются от таковых для основного металла).

Ключевые слова: комбинированные способы сварки, лазерная и высокочастотная сварка, оборудование, режимы, структура

Исследованиям совместного воздействия на металлы излучения лазера и других источников тепла при сварке, например дугового разряда [1, 2] или высокочастотного тока [3], уделяли большое внимание с целью увеличения глубины проплавления или производительности процесса.

Сварка высококонцентрированным тепловым источником, в частности лазерная, характеризуется жестким термическим циклом, что в ряде случаев является отрицательным фактором, способствующим образованию трещин и нежелательных хрупких закалочных структур [4]. Для устранения этого недостатка, а также с целью увеличения глубины проплавления (или скорости сварки) нами исследована лазерная сварка стыковых соединений с сопутствующим высокочастотным подогревом. В нашем случае сваривали подготовленные стыковые соединения, в отличие от описанного в статье [3] соединения, которое формировалось в процессе сварки продольного шва трубы, когда высокочастотные токи сгущались в точке стыка, образуя высокоинтенсивный источник тепла.

Для экспериментов использовали технологический лазер ЛТ 104 мощностью излучения до 10 кВт [5] и сварочный высокочастотный комплекс ИВ120-160/0,44 мощностью 160 кВт и рабочей частотой 0,44 МГц. В качестве сварочного поста применяли переоборудованный токарно-винторезный станок, на котором вместо резцедержателя была установлена колонна с фокусирующей лазерное излучение оптикой, а вместо задней бабки — жестко связанная с суппортом подвижная сварочная высокочастотная головка [6]. К головке крепили одновитковый кольцевой индуктор, нагревавший свариваемый стык. Индуктор изготавливали из медной трубки диаметрами 6 и 8 мм. Зазор между индуктором и свариваемыми образцами составлял 3 мм. Температуру высокочастотного подогрева на внешней и внутренней поверхностях свариваемых трубных образцов измеряли оптическим пирометром «Спектропир П1-003» (1986 г.,

НПО «Лентеплоприбор») с диапазоном измерения температуры 600...1800 °С и основной инструментальной приведенной погрешностью $\pm 1\%$.

Сварку стыковых соединений трубных образцов с толщиной стенки $\delta = 15$ мм производили в углекислом газе. Его поддув организовали таким образом, чтобы устранить плазменный факел над сварочной ванной из-за происходящего по плазме пробоя и образования дугового разряда между индуктором и образцом. Материал образцов — сталь СтЗпс. Для сравнения выполняли также по четыре наплавки без присадок лазерным излучением (имитация лазерной сварки) без высокочастотного подогрева и с ним на скоростях 30, 60, 90 и 120 м/ч. Мощность лазерного излучения во всех случаях составляла 5 кВт, заглубление фокуса — 2 мм, фокусное расстояние линзы — 300 мм, тем-

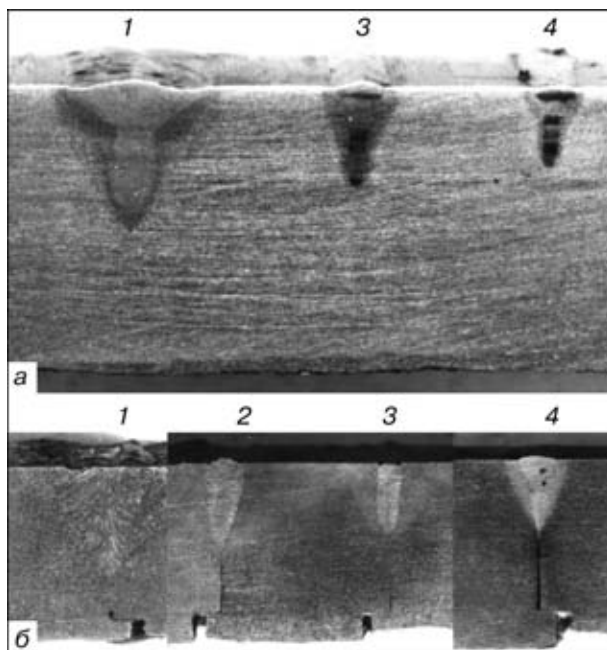


Рис. 1. Макрошлифы лазерных наплавки без присадки (а) и стыковых соединений, выполненных комбинированным способом (б) в стенке $\delta = 15$ мм трубного образца из стали СтЗпс на скорости 30 (1); 60 (2); 90 (3); 120 (4) м/ч

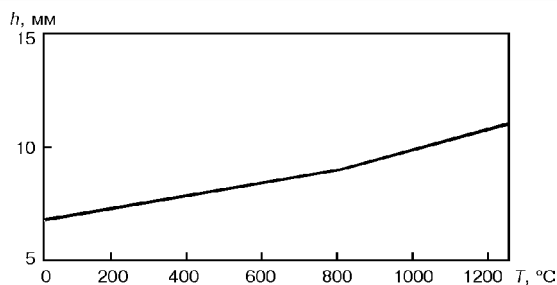


Рис. 2. Зависимость изменения глубины провара h от температуры T сопутствующего высокочастотного подогрева при скорости сварки 60 м/ч

пературу сопутствующего высокочастотного подогрева варьировали в пределах 800...1500 °С.

Согласно принятой схеме проведения экспериментов высокочастотный подогрев свариваемых кольцевых стыков производили со стороны наружной поверхности образца. Толщина стенок трубчатых образцов составляла 15 мм. Перепад температуры по этой глубине достигал 500...800 °С, что в значительной мере влияло на глубину провара.

Наиболее характерные макрошлифы сварных швов представлены на рис. 1. Зависимости геометрии швов от некоторых режимов комбинированного сварочного процесса представлены на рис. 2, 3. Эксперименты показали, что высокочастотный подогрев поверхности стального образца до 1100...1200 °С позволяет увеличить глубину провара примерно в 1,5 раза по сравнению с обычной лазерной сваркой. При этом сохраняется кинжальная форма проплавления.

Микроструктуры сварных швов исследовали по микрошлифам, протравленным 4%-м спиртовым раствором азотной кислоты в течение 5 с. Осмотр их производили на оптическом микроскопе «Nephrot-32» при увеличениях 50...250, размер зерна измеряли по ГОСТ 5639-82, микротвердость определяли на твердомере «Лесо» при нагрузках 0,10; 0,25; 2,0 и 10,0 Н.

Структура основного металла — ферритно-перлитная. Балл ферритного зерна составлял 7...8; микротвердость — HV 10-1660...1800 МПа. После лазерной сварки, как следовало ожидать и что согласуется с результатами работы [7], в металле швов и металле зоны термического влияния (ЗТВ) обнаружены не только структуры феррита и перлита, но и бейнита, мартенсита. После комбинированной лазерной сварки с высокочастотным подогревом в металле швов и металле ЗТВ зафиксированы лишь ферритно-перлитные структуры,

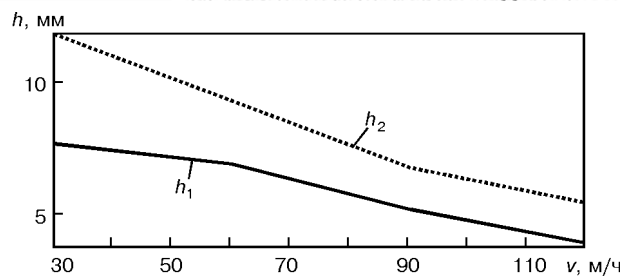


Рис. 3. Зависимость изменения глубины лазерного провара h_1 и провара h_2 с сопутствующим высокочастотным подогревом до 1100...1200 °С от скорости сварки

свидетельствующие об отсутствии жесткого термического цикла [4], т. е. о значительном снижении скоростей охлаждения. Результаты измерений микротвердости структурных составляющих металла швов и ЗТВ для обоих случаев сварки приведены в таблице.

Распределение микротвердости (нагрузка HV 10 Н) в металле шва и околошовной зоны при скоростях сварки 30, 90 и 120 м/ч приведены на рис. 4.

В случае лазерной сварки со скоростью 30 м/ч зафиксирована самая грубодисперсная структура металла образцов лазерных наплавов. Структура металла шва состоит из бейнита, в котором изредка встречаются участки мартенсита. Вдоль границ кристаллитов зафиксированы ферритные участки, присутствует небольшое количество перлита. Ширина металла ЗТВ равняется 1,6 мм с участком перегрева шириной 0,9 мм, мелкого зерна — 0,30 мм, неполной перекристаллизации — 0,38 мм. Структура металла участка перегрева представляет собой мелкоигльчатую смесь участков мартенсита и бейнита, а также локальных выделений перлита и феррита. На участке перегрева балл зерна — 5, редко встречаются зерна балла 4. На участке мелкого зерна структура измельчается до балла 10.

Структура металла шва и ЗТВ образца, сваренного с использованием лазерного излучения со скоростью 90 м/ч, аналогична упомянутой выше, но более мелкодисперсная. Металл ЗТВ шириной 0,68 мм состоит из участков перегрева (0,25 мм), мелкого зерна (0,13 мм) и неполной перекристаллизации (0,30 мм). На участке перегрева он соответствует баллу 5, реже баллу 6. По мере удаления от линии сплавления зерно измельчается до балла 7-8.

Металл шва при лазерной сварке со скоростью 120 м/ч характеризуется самой мелкодисперсной

Микротвердость структурных составляющих металла швов ЗТВ, полученных лазерной и комбинированной сваркой, МПа

Скорость сварки, м/ч	Лазерная сварка, HV 0,1				Комбинированная сварка HV 0,25	
	Феррит	Перлит	Бейнит	Мартенсит	Феррит	Перлит
30	1680...1750	1980...2290	2050...2570	3030...3220	876...891	—
	1810...2050	1850...2050	2290...2580	3300...3780	805...839	1160...1200
60	—	—	—	—	958...940	—
	—	—	—	—	824...839	—
90	1810...1850	1810	2740...3300	3780...4510	772...876	—
	2050	2270	3000...3250	3850...4290	805...1050	—
120	—	—	2900...3030	3960...4130	997...1050	1220...1360
	—	2030...2380	—	5930	925...1050	1050...1220

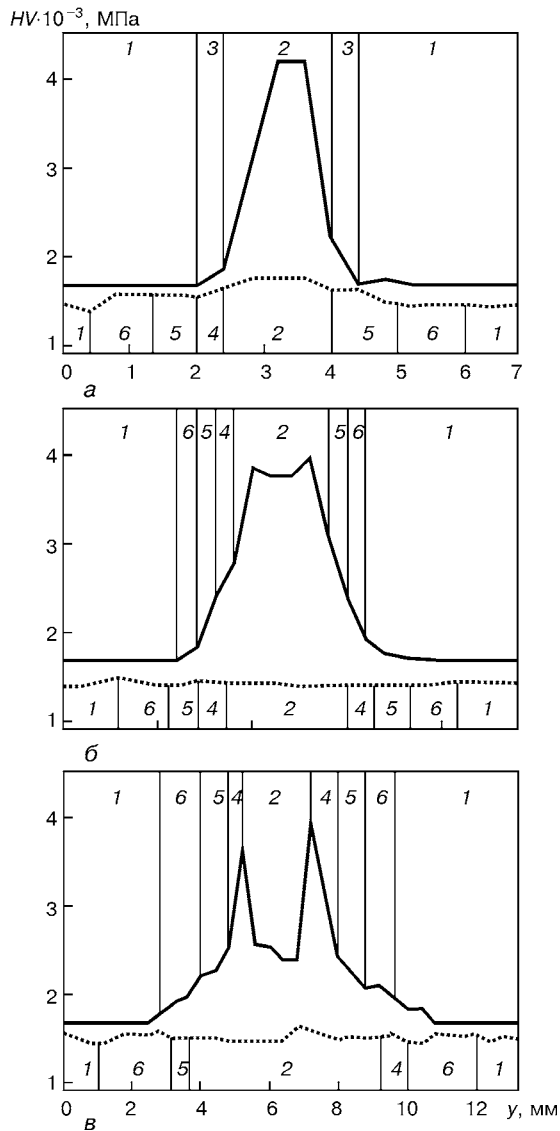


Рис. 4. Распределение микротвердости HV в направлении y , перпендикулярном плоскости проваренного стыка, на глубине $h/3$ для лазерной (сплошная кривая) и комбинированной (точечная) сварки с высокочастотным подогревом до $1100...1200^\circ\text{C}$ при скорости 120 (а); 90 (б); 30 (в): 1 — основной металл; 2 — сварной шов; 3 — ЗТВ; 4–6 — участки соответственно крупного и мелкого зерна, неполной перекристаллизации

структурой, состоящей из мартенсита, бейнита и тонких выделений перлита вдоль границ кристаллитов. Мартенсит имеет разную травимость, что связано с присутствием в нем углерода (более светлые участки, вероятно, более мелкодисперсный, малоуглеродистый мартенсит [7]). Металл ЗТВ имеет ширину $0,15...0,20$ мм и представляет собой участок перегрева. Структура участка — мелкоугольчатый мартенсит и локальные перлитные выделения (таблица).

Прослеживаются следующие тенденции изменения структуры металлов швов. С повышением скорости сварки дисперсность структуры увеличивается, размеры литой зоны и металла ЗТВ уменьшаются, возрастает их микротвердость. Последнее объясняется увеличением доли мартенситной составляющей и уменьшением количества перлита и феррита вплоть до полного исчезновения. В металле ЗТВ объединяются зоны мелко и крупного

зерна, а при максимальной скорости сварки ЗТВ представляет собой участок перегрева.

Структура металла шва, сваренного комбинированным способом лазер+высокочастотный подогрев со скоростью 30 м/ч, — ферритно-перлитная с небольшим количеством феррита, характерным для видманштеттовой структуры [4]. Структура зоны перегрева более грубодисперсная, чем во всех прочих образцах, сваренных с применением лазерного излучения с высокочастотным подогревом. Первичное зерно аустенита стало крупнее (балл 4–5). Феррит выделяется по границам зерен и внутри них (таблица). Количество перлита увеличивается по сравнению с наплавками, выполненными на скоростях $60, 90$ и 120 м/ч.

Микроструктура металла шва, сваренного комбинированным способом со скоростью 60 м/ч, более грубопластинчатая, чем при скорости 90 м/ч, но мелкодисперснее, чем при скорости 30 м/ч. Количество перлита уменьшается, его выделения довольно мелкие. Твердость перлита в металле шва не определена, феррита — приведена в таблице. Структура зоны перегрева также ферритно-перлитная. Количество перлита здесь незначительно. Феррит выделяется по границам первичных аустенитных зерен и в теле зерна. Балл зерна составляет примерно 5.

Структура металла шва, полученного при комбинированной сварке со скоростью 90 м/ч, отличается укрупнением составляющих и уменьшением количества перлита по сравнению с аналогичным вариантом для скорости 120 м/ч. Микротвердость феррита указана в таблице. Микротвердость перлита не измеряли, поскольку перлитные участки слишком мелкие. Структура участка перегрева ферритно-перлитная. Количество феррита увеличилось и стало значительно преобладающим. Феррит выделяется по границам первичных аустенитных зерен и в теле зерна. Незначительная часть феррита ориентирована по Видманштетту [4]. Балл зерна 6. Структура участка полной перекристаллизации — мелкозернистая (балл 9–10) ферритно-перлитная, количество феррита преобладает, а участка неполной перекристаллизации также — ферритно-перлитная.

В образце, сваренном комбинированным способом со скоростью 120 м/ч, структура металла шва представляет собой смесь феррита и перлита. Количество феррита здесь преобладает. Структура направлена вдоль границ кристаллитов и является мелкодисперсной. Участок перегрева представляет собой перлитные зерна, окаймленные ферритными выделениями по границам. По мере удаления от линии сплавления количество перлитной составляющей уменьшается, структура измельчается. Балл зерна на этом участке составляет 5–6. Участок полной перекристаллизации имеет мелкозернистую (балл 9–10) ферритно-перлитную структуру с преобладанием ферритной составляющей. Участок неполной перекристаллизации имеет аналогичную структуру с таким же баллом зерна, как и участок полной перекристаллизации.

Зафиксированы следующие тенденции изменения структуры металла швов. Как и в случае ла-



зерной сварки, с повышением скорости процесса дисперсность структуры возрастает, оставаясь при этом более грубой, размеры литой зоны и металла ЗТВ уменьшаются. В случае максимальной скорости обнаружено незначительное повышение микротвердости металла сварного шва. Это объясняется тем, что с увеличением скорости сварки доля ферритной составляющей структур металла шва и ЗТВ возрастает. Однако во всех случаях имеет место достаточно мягкая и пластичная ферритно-перлитная структура. В отличие от лазерной сварки при комбинированном процессе в металле ЗТВ сохраняются все зоны независимо от скорости сварки.

По результатам исследования микроструктур можно заключить, что высокочастотный подогрев свариваемых образцов позволяет получать структуры металла швов и ЗТВ, близкие к таковым основного металла. При этом он способствует избавлению от твердых и хрупких мартенситных структур, которые при лазерной обработке могут приводить к образованию трещин, снижению ударной вязкости и пластичности [6]. Кроме того, как показали эксперименты, благодаря сопутствующему высокочастотному подогреву значительно снижается вероятность образования пор, формирование верхнего валика шва улучшается.

Несмотря на различие схем наших экспериментов и описанных в работе [3], целесообразно отметить некоторые общие моменты. В диапазоне температур высокочастотного подогрева 20... 1200 °С повышение скорости сварки [3] и увеличение глубины проплавления в нашем случае (см. рис. 2) имеют сходную тенденцию. Как и в работе [3], получен близкий по структуре к основному металлу металл швов и ЗТВ. Также важным оказался вопрос подачи защитного газа и устранения плазменного факела. Как отмечалось в статье [3], на процесс сварки значи-

тельно влияет точность стыковки свариваемых кромок.

Выводы

1. Сопутствующий высокочастотный подогрев до 1100... 1200 °С на поверхности образца позволяет примерно в 1,5 раза повысить либо глубину проплавления, либо скорость сварки.

2. Сварные швы, выполненные с высокочастотным подогревом, по форме близки к типичным лазерным, но их структура различна.

3. Отсутствуют характерные для лазерной сварки закалочные структуры в металле швов и ЗТВ, их микротвердость становится значительно равномернее и ближе к таковой основного металла, что является положительным фактором, способствующим увеличению пластичности швов.

4. К недостаткам структуры металла швов и ЗТВ, полученных комбинированной сваркой, следует отнести укрупнение зерна.

1. *Dilthey U., Lueder F., Wieschemann A.* Technical and economical advantages by synergies in laser arc hybrid welding // *Welding in the World*. — 1999. — Vol. 43. — P. 141–152.
2. *Nagata S., Katsumura M., Matsuda J., Hamasaki M.* Laser welding combined with TIG or MIG. — S. 1., [1985]. — Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-390–85 IW. — 8 p.
3. *Хаяси Т.* Применение сварки с предварительным высокочастотным нагревом для производства толстостенных труб среднего диаметра // Сб. ст. науч. о-ва по лазер. обраб. — 1998. — 44, № 7. — С. 137–144.
4. *Грабин В. Ф.* Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 415 с.
5. *Технологический СО₂-лазер ЛТ 104 мощностью 10 кВт / В. П. Гаращук, В. Д. Шелягин, О. К. Назаренко и др. // Автомат. сварка. — 1997. — № 1. — С. 36–39.*
6. *Лазерное термоупрочнение комплексно-легированных сталей с низким и средним содержанием углерода / В. Ю. Хаскин, С. Ю. Павловский, В. П. Гаращук и др. // Доп. НАН України. — 2000. — № 2. — С. 36–39.*
7. *Упрочнение деталей лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак. — Киев: Техніка, 1981. — 131 с.*

A joint effect of laser radiation and HF heating on steel in butt welding has been studied. It is found that concurrent HF heating up to sample surface temperature equal to 1100 ...1200 °C allows about 1.5 times improvement of either the penetration depth, or process speed. Weld geometry is close to the one typical for laser welding, but they differ structurally (hardening structures in the metal of the welds and HAZ characteristic of laser welding, are absent, hardness values are closer to those of the base metals.

Поступила в редакцию 04.04.2001,
в окончательном варианте 17.04.2001