

## ВНЕВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Ф.-В. БАХ, А. БЕНЬЯШ, К. ЛАУ, Р. КОНЬЯ (Ин-т материаловедения Ганноверского ун-та им. Лейбница, Германия)

Приведены результаты экспериментов по применению электронно-лучевой сварки в атмосфере для сварки конструкционных и высокопрочных сталей толщиной до 20 мм. Показано, что после плазменной или лазерной резки нет необходимости в механической обработке кромок перед сваркой. Комплекс испытаний показал высокое качество сварных соединений.

*Ключевые слова:* вневакуумная электронно-лучевая сварка, сварочная установка, нержавеющая сталь, высокопрочные стали, глубина проплавления, присадочная проволока, формирование корня шва, скорость сварки, металлографические исследования, механические свойства

Первые публикации по успешному практическому применению электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в атмосфере относятся к 1960-м годам [1–3]. Высокая производительность процесса и возможность его интеграции в существующие поточные линии обусловила интерес к нему, в первую очередь, со стороны автомобилестроительной промышленности. С начала 1990-х годов наблюдается новая волна интереса к электронно-лучевой технологии, что объясняется новыми тенденциями в современном автомобилестроении, связанными, в частности, с разработкой облегченных конструкций кузовов с применением алюминиевых сплавов [4, 5]. Следует отметить, что ЭЛС в атмосфере применяется в настоящее время исключительно для соединения тонколистовых материалов в автомобилестроении и является практически единственной отраслью промышленности, где она внедрена достаточно широко. Однако возможности данной технологии далеко не исчерпываются этой единственной отраслью. Внедрение новых материалов и требования к увеличению производительности труда заставляют производителей искать новые перспективные технологические процессы. В последнее время большой интерес к ЭЛС в атмосфере проявляют крано-, судостроительная промышленность и другие области машиностроения. В рамках данной работы оценены перспективы применения ЭЛС в атмосфере для сварки толстолистовых материалов.

**Экспериментальные исследования.** ЭЛС в атмосфере проводили на сварочной установке марки NV-EBW 25-175 TU фирмы «PTR Präzisionstechnik GmbH» (рис. 1). Она имеет много общего с широко распространенными установками для сварки в вакууме и состоит из высоковольт-

тного источника с рабочим напряжением 175 кВ и электронной пушки с максимальным током луча 140 мА. Вывод луча в атмосферу осуществляется с помощью трехступенчатой системы откачки, при этом для уменьшения рассеяния луча в выходную ступень пушки подается гелий. Для перемещения свариваемых деталей имеется координатный стол с числовым программным управлением фирмы «Simens». Для выполнения вспомогательных операций в состав установки входит промышленный робот фирмы «Kuka». Технические характеристики установки следующие:

Рабочее напряжение, кВ .....	175
Максимальный ток луча, мА .....	140
Размеры стола, мм .....	800×1200
Ход стола вдоль координаты X (Y), мм .....	3000 (800)
Вертикальный ход пушки вдоль оси Z, мм .....	1200
Угол наклона пушки, град .....	0...90
Максимальная скорость сварки, м/мин .....	20

Предварительные опыты по определению зависимости глубины проплавления от параметров сварки, проведенные на образцах из различных сплавов, показали широкие возможности применения установки NV-EBW 25-175 TU для сварки толстолистовых материалов. На рис. 2 приведена

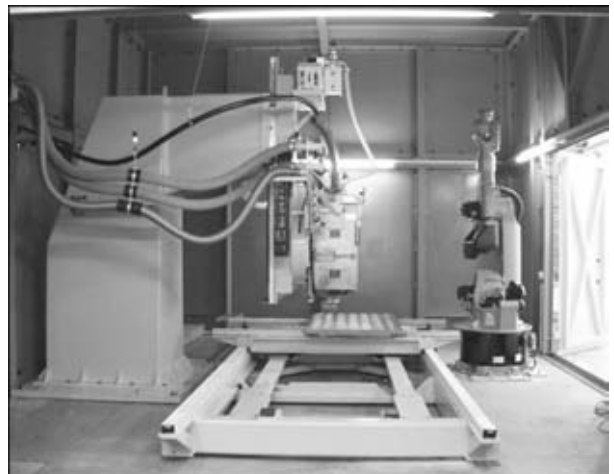


Рис. 1. Установка для ЭЛС в атмосфере в Институте материаловедения Ганноверского университета

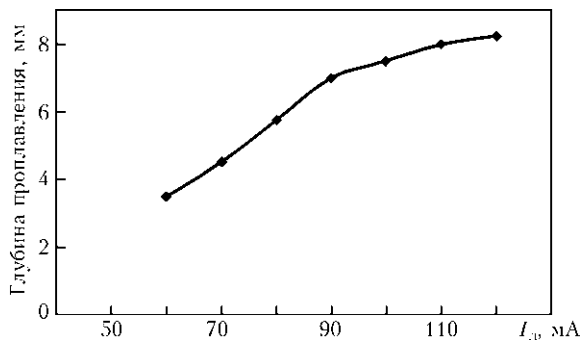


Рис. 2. Зависимость глубины проплавления от тока луча для стали X2CrNi 18 9

типичная зависимость глубины проплавления от тока луча, а на рис. 3 — макрошлиф поперечных сечений глубины проплавления для стали X2CrNi 18 9 при различных токах луча (рабочее расстояние 10 мм, скорость сварки 3 м/мин).

На рис. 4 приведена зависимость глубины проплавления от скорости сварки.

Важным отличием ЭЛС в атмосфере от традиционной вакуумной ЭЛС является существенная зависимость глубины проплавления от рабочего расстояния, что объясняется значительным рассеянием луча в атмосфере (рис. 5).

Проведенные предварительные исследования показали, что установка NV EBW 25-175 TU позволяет сваривать толстолистовой материал с высокой производительностью. Недостатком ЭЛС в атмосфере является резкое падение концентрации энергии в пятне луча с увеличением рабочего расстояния, что накладывает определенные ограничения на выбор геометрии свариваемых деталей.

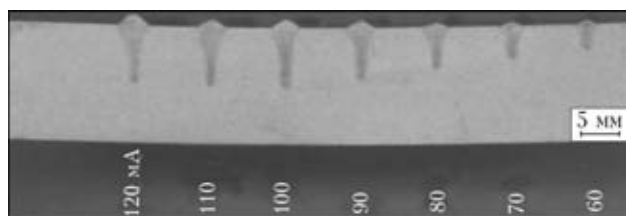


Рис. 3. Макрошлиф поперечных сечений глубины проплавления для стали X2CrNi 18 9 при различных значениях тока луча

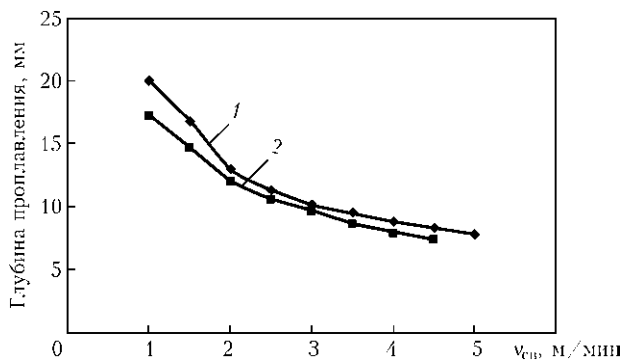


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления от скорости сварки на стали X2CrNi 18 9 (рабочее расстояние 10 мм): 1 —  $I_L = 140$  мА; 2 — 120

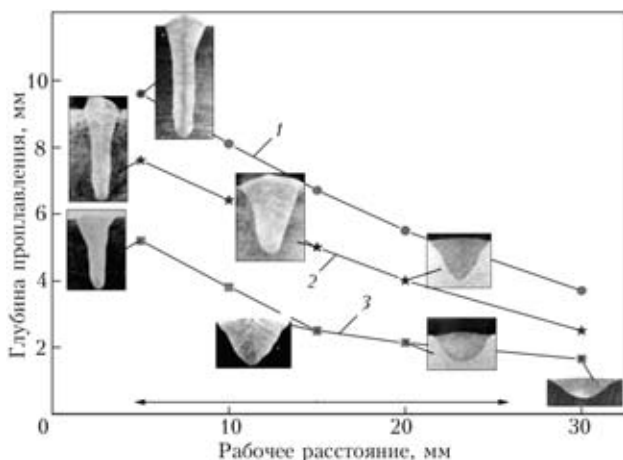


Рис. 5. Зависимость глубины проплавления от рабочего расстояния на стали X2CrNi 18 9 при скорости сварки 5 м/мин: 1 —  $I_L = 140$  мА; 2 — 100; 3 — 60

Наиболее просто реализовать преимущества ЭЛС в атмосфере при выполнении горизонтальных швов большой протяженности, например, сварке панелей в судостроении, сварке продольных швов при производстве труб и т. п.

*Сварка высокопрочных сталей в краностроении.* Одной из возможных областей применения ЭЛС в атмосфере является краностроение. Требования к увеличению грузоподъемности с одновременным снижением массы подъемных кранов потребовали применения высокопрочных сталей с пределом прочности до 1300 МПа. По заказу фирмы «GEC Ehingen» проведены эксперименты по ЭЛС в атмосфере высокопрочных сталей, применяемых при изготовлении телескопических стрел мощных (до 500 т) автокранов. Эти стали бейнитно-мартенситного класса поставляются в термообработанном состоянии, во избежание резкого снижения их механических свойств при отпуске сварку таких материалов следует проводить на достаточно высоких скоростях. Эксперименты проводили на пластинах из сталей S960QL, S1100QL, S1300QL фирмы SSAB, механические свойства которых приведены в табл. 1.

Образцы размером 500×200×6 мм сваривали встык без дополнительной подготовки кромок после лазерной резки. Часть образцов сваривали с применением присадочной проволоки Draht Union X90 (GMn4Ni2CrMo) (EN 12534) диаметром 1,2 мм. Скорость сварки составляла 2,5...3 м/мин, ток луча 100...130 мА, рабочее расстояние 15 мм, скорость

Таблица 1. Механические свойства сталей для краностроения

Материал	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\epsilon$ , %
S960QL	980...1150	960	12
S1100QL	1200...1500	1100	10
S1300QL	1400...1700	1300	8

Таблица 2. Результаты механических испытаний сварных соединений толщиной 6 мм на растяжение

Материал	$v_{св}$ , м/мин	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Присадка	Характер разрушения	Способ сварки
S960QL	3	1190	1037	Без присадки	Основной металл	ЭЛС
S1100QL	3	1310	1250	»	ЗТВ	»
S1100QL	2,5	1485	1420	X 90	»	»
S1300QL	3	1315	1300	Без присадки	»	»
S1300QL	2,5	1440	1385	X 90	»	»
S1100QL	0,6	1265	1207	X 90	»	Плазма + МИГ
S1300QL	0,8	1235	1160	X 90	»	Плазма + МИГ

подачи проволоки 8 м/мин. Пробы, изготовленные из сваренных образцов, подвергали испытаниям на растяжение. Результаты механических испытаний приведены в табл. 2, где для сравнения приведены также механические свойства соединений, выполненных гибридной сваркой плазма+МИГ при скорости сварки 0,6...0,8 м/мин [4]. Для стали S960QL на оси шва наблюдается увеличение микротвердости на  $HV_{0,2}$  — 50 в поперечном сечении сварного шва по сравнению с основным металлом. Для сталей S1100QL и S1300QL наблюдался провал микротвердости в металле ЗТВ на  $HV_{0,2}$  — 50. При гибридной сварке провал микротвердости металла в ЗТВ возрастал до  $HV_{0,2}$  — 100. Полученные данные хорошо согласуются с результатами механических испытаний. Проведенные опыты показали, что замена гибридной сварки на ЭЛС в атмосфере, помимо значительного увеличения скорости сварки, позволяет также улучшить механические свойства соединений.

*Сварка судостроительной стали D36.* Перспективной областью использования ЭЛС в атмосфере является судостроение, где характерно применение толстолистовых материалов и протяженных прямолинейных швов. В сотрудничестве с верфью HDW-Gaarden GmbH и с производителем оборудования для судостроительных заводов фирмой «ISU-GmbH» были проведены исследования по оценке возможности замены традиционной для судостроения технологии сварки под флюсом на ЭЛС в атмосфере. При этом ставилась задача по-

лучения односторонних швов с качественным обратным формированием без дополнительной подготовки кромок после термической резки. В этом случае значительное рассеяние электронного луча, обычно причисляемое к недостаткам ЭЛС в атмосфере, оказывается весьма полезным свойством и позволяет надежно перекрывать свариваемые кромки. Опыты проводили на образцах из судостроительной стали D36 ферритно-перлитного класса размером 500×150 мм толщиной от 4 до 20 мм. Подготовка кромок после плазменной резки заключалась в удалении тонкого слоя окалины с помощью металлической щетки.

Материал толщиной 4 мм сваривали без присадочной проволоки. Технологические испытания на загиб (рис. 6) и статическое растяжение в соответствии со стандартом DIN EN 10002 показали хорошее качество соединения.

Материал толщиной 10, 15 и 20 мм сваривали с применением присадочной проволоки. Типичная конфигурация стыка перед сваркой приведена на рис. 7.

Благодаря большому диаметру луча, зазор в верхней части стыка составляет 3,4 мм для материала толщиной 20 мм и не является препятствием для сварки, в отличие от острофокусированных лазерных или вакуумных электронных пучков. Для компенсации зазоров в стыке при сварке материала толщиной 10, 15, и 20 мм при-

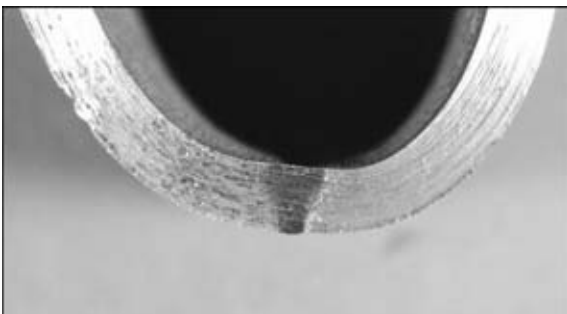


Рис. 6. Вид сварного образца из материала толщиной 4 мм после испытаний на загиб

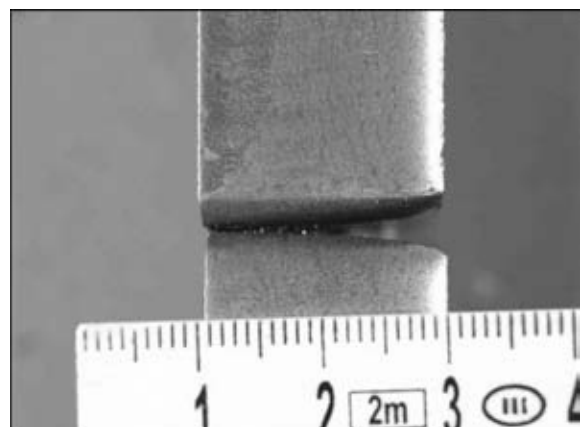


Рис. 7. Конфигурация стыка пластин толщиной 20 мм перед сваркой



Таблица 3. Режимы сварки образцов из стали D36

№ образца	Толщина образца, мм	Ток луча, мА	Скорость сварки, м/мин	Рабочее расстояние, мм	Скорость подачи, м/мин	Номер прохода	Вид присадки
66	4	110	4,5	10	—	1	—
59	10	140	2,2	10	—	1	—
59	10	50	1,4	15	10	2	Autrod 12.58
36	15	140	1,5	10	—	1	—
36	15	65	1	10	7	2	G3Si
25	20	135	1	10	2,2	1	G3Si

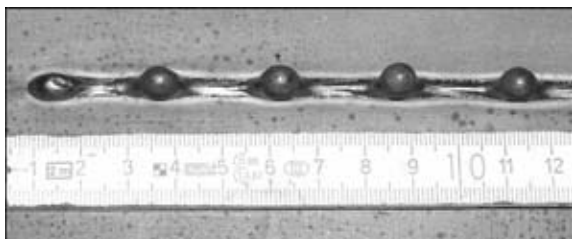


Рис. 8. Дефекты корня шва при сварке материала толщиной 20 мм без подкладки

меняли присадочную проволоку. При этом сталь толщиной 10 мм сваривали за один проход с одновременной подачей в зону сварки проволоки марки Autrod 12.58 (EN 440, G2Si) диаметром 1 мм. Материал толщиной 10 и 15 мм сваривали за два прохода. Сварка основного сечения стыка и формирование обратного валика происходили при первом проходе без подачи присадочной проволоки. Во время второго прохода происходило заполнение недостающего сечения стыка и формирование поверхности шва с помощью присадочной проволоки G3Si (EN 440) диаметром 1,6 мм. Режимы сварки приведены в табл. 3.

Сварка материала толщиной 10 мм не представляла особых затруднений, в то время как при сварке материалов больших толщин (15 и 20 мм) основной проблемой являлось обеспечение на-

дежного формирования корня шва. Как показали эксперименты, свободное формирование корня шва для материала толщиной 15 мм возможно при тщательном подборе и строгом соблюдении параметров сварки. Для материала толщиной 20 мм свободное формирование корня шва приводит к появлению дефекта в виде периодических провисаний жидкого металла (рис. 8).

Для устранения этого дефекта применяли сварку на подкладке. При этом первый проход выполняли ЭЛС на подкладке из флюса ОР 122 фирмы «OERLIKON», а второй — ЭЛС с подачей присадочной проволоки или дуговой сваркой под флюсом. Внешний вид обратного валика при различных вариантах сварки приведен на рис. 9.

Металлографические исследования показали отсутствие дефектов в виде пор и трещин. На рис. 10 приведены макрошлифы образца толщиной 15 мм, сваренного ЭЛС в два прохода с применением присадочной проволоки G3Si. В поперечном сечении шва наблюдались максимальные значения микротвердости  $HV_{0,2}$  — 374 на оси шва с плавным понижением по линии поперечного сечения шва до микротвердости основного металла  $HV_{0,2}$  — 232, провалов микротвердости в металле ЗТВ не наблюдалось.

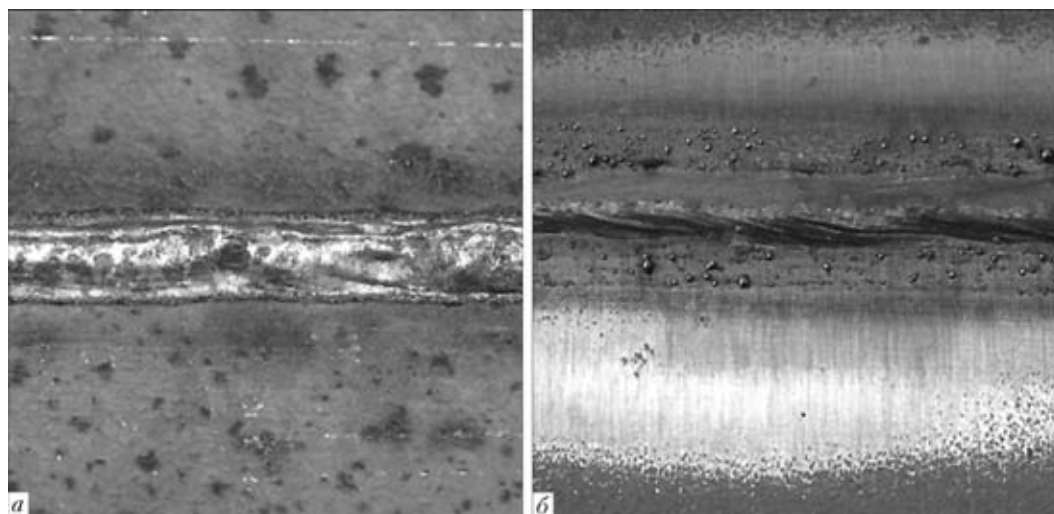


Рис. 9. Внешний вид корневой части шва на подкладке из флюса ОР 122 толщиной 20 мм (а) и при свободном формировании толщиной 15 мм (б)

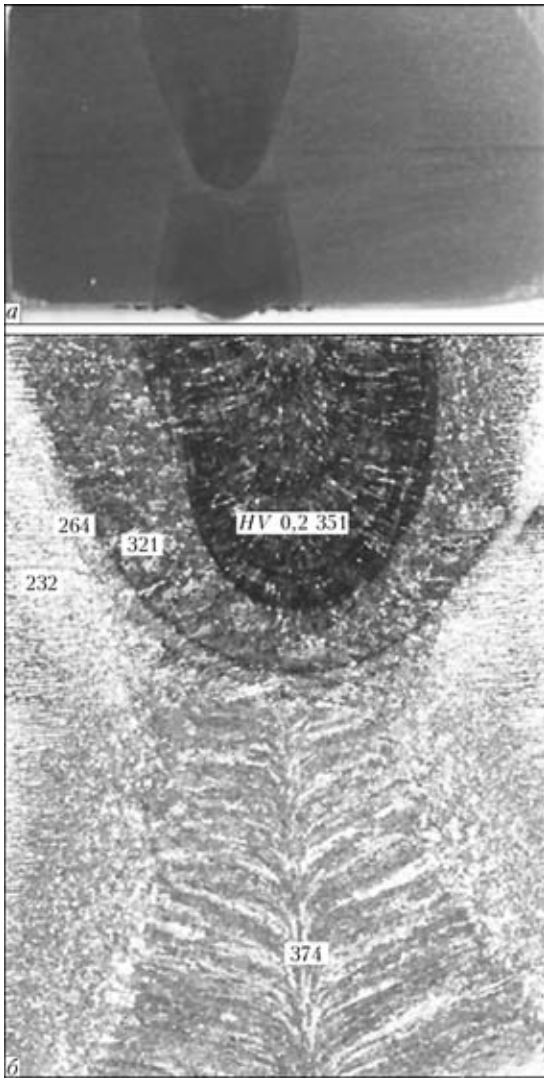


Рис. 10. Макрошлифы (а,  $\times 1,5$ ) и (б,  $\times 16$ ) поперечного сечения образца толщиной 15 мм, выполненного ЭЛС в два прохода с присадкой G3Si

Приведены макрошлифы поперечного сечения шва на материале толщиной 20 мм после первого прохода, выполненного ЭЛС, и второго прохода, выполненного дуговой сваркой под флюсом (рис. 11). Оба прохода выполняли без какой-либо подготовки кромок. Испытания на статическое растяжение в соответствии со стандартом DIN EN 10002 показали хорошее качество соединения. Во время механических испытаний на статическое растяжение все образцы разрушались по основному металлу (рис. 12). Механические свойства сварных соединений приведены в табл. 4.

Помимо испытаний на статическое растяжение, проводили испытания на ударную вязкость в соответствии с требованиями Германского Ллойда и стандарта DIN EN 10045. Работа удара для стандартной пробы Шарпи при  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  составляла 83 Дж для металла шва и 64 Дж в металле ЗТВ, что значительно выше значения 47 Дж, требуемого стандартом.

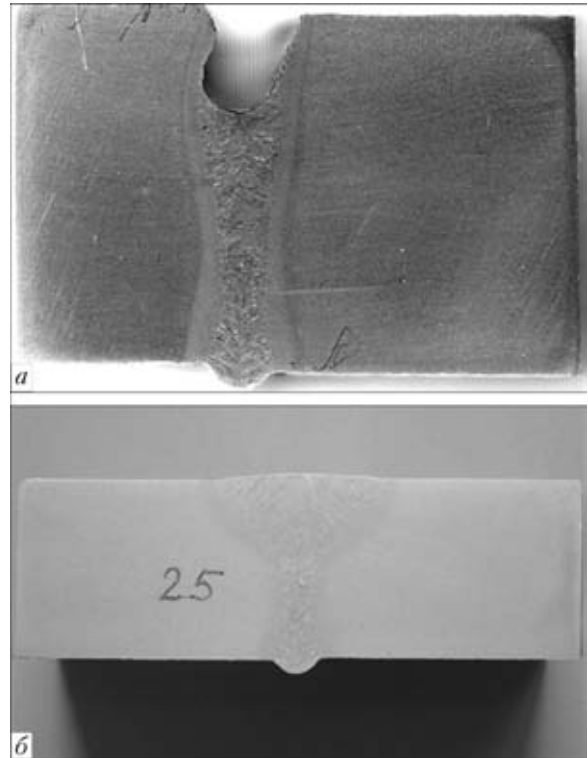


Рис. 11. Макрошлифы поперечного сечения шва образца толщиной 20 мм после первого прохода, выполненного на подкладке из флюса ОР 122 (а), и второго прохода, выполненного сваркой под флюсом ОР 122 (б)



Рис. 12. Внешний вид сварного образца толщиной 15 мм после испытаний на растяжение

Таблица 4. Механические свойства\* сварных образцов из стали D36

Толщина свариваемого металла, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\epsilon$ , %
4	513	357	14
10	552	379	11
15	581	386	11

\* Механические свойства основного металла следующие:  $\sigma_b = 490...630$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 355$  МПа;  $\epsilon = 21$  %. Образцы разрушались по ОМ.

Проведенные исследования показали высокую эффективность применения ЭЛС в атмосфере для сварки толстолистовых материалов.

**Выводы**

1. Сварочная установка марки NV-EBW 25-175 TU 2 позволяет проводить сварку сталей толщиной до 20 мм.
2. Большой диаметр луча при ЭЛС в атмосфере обеспечивает надежную сварку при наличии значительных сборочных зазоров.
3. Термический цикл сварки не приводит к заметному ухудшению свойств высокопрочных сталей бейнитно-мартенситного класса.
4. Замена гибридной сварки на ЭЛС в атмосфере, помимо значительного увеличения скорости сварки, позволяет улучшить также механические свойства швов высокопрочных сталей для крапостроения.
5. Сварка судостроительной стали толщиной 4...20 мм не требует дополнительной подготовки

кромки после термической резки и обеспечивает механические свойства соединений, удовлетворяющие нормам DIN EN 10045 и Германского Ллойда.

1. Bennet M. G. Out-off-vacuum electron-beam welding // Welding and Metal Fabr. — 1970. — № 3. — P. 105–113.
2. O'Neil F. P. High speed electron beam welding of tube // Can. Weld. and Fabr. — 1967. — № 11. — P. 26–28.
3. Duhamel R. F. Non-vacuum electron beam welding technique development and progress // Welding J. — 1965. — № 6. — P. 465–474.
4. Schubert G., Holdgruben H., Gomes-Buco J. Nonvacuum electron beam welding of aluminium structural beams: Intern. Body Eng. conf. — Detroit, Michigan, 1996. — P. 58–61.
5. Nonvacuum electron beam welding a beam process for welding zinc coated high strength steels and steel-aluminium hybrid structures / Fr.-W. Bach, A. Beniyash, K. Flade, R. Versemann // Proc. of 4th conf. LANE, Erlangen, Germany, Meisenbach-Verl., Bamberg, 2004. — Vol. 1. — P. 247–258.

Experimental results are given on application of atmospheric EBW for welding structural and high-strength steels up to 20 mm thick. It is shown that no machining of edges prior to welding is required after plasma and laser cutting. The high quality of welded joints was proved by comprehensive tests.

Поступила в редакцию 18.11.2008

**Вышла в свет новая книга!**

**Троицкий В. А.** Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений. — Киев: Феникс, 2009. — 275 с.

*Рассмотрены основные требования и правила выполнения визуально-измерительного контроля сварных соединений и металлоконструкций, описаны основные технические средства, применяемые для этих целей.*

*Настоящее пособие будет полезно дефектоскопистам, выполняющим визуально-измерительный контроль, а также абитуриентам, готовящимся получить право на ведение этого вида неразрушающего контроля.*

Можно также приобрести следующие информационные материалы по неразрушающему контролю:

- ✓ Краткое пособие по контролю качества сварных соединений, 316 с., 2006 г. (40,0 грн.)
- ✓ Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин, 306 с., 2002 г. (80,0 грн.)
- ✓ Ультразвуковой контроль. Дефектоскопы. Нормативные документы. Стандарты по УЗК, 221 с., 2006 г. (80,0 грн.)
- ✓ Пособие по радиографии сварных соединений, 312 с., 2008 г. (80,0 грн.)
- ✓ Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, 275 с., 2009 г. (80,0 грн.)
- ✓ Учебно-методические плакаты по неразрушающему контролю.

**УО НКД, ул. Боженко, 11, Киев-150, ГСП, 03680  
или по факсу: (044) 289-21-66.**

