



## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРНОГО ШВА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ В ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЕ\*

**У. РАЙЗГЕН**, проф., **М. ШЛЕЗЕР**, д-р-инж., **А. АБДУРАХМАНОВ**, инж.

(Ин-т сварки и соединений, г. Аахен, Германия),

**Г. ТУРИЧИН**, д-р техн. наук, **Е. ВАЛДАЙЦЕВА**, инж.

(Ин-т лазерных и сварочных технологий СПбГПУ, РФ),

**Ф.-В. БАХ**, проф., **Т. ХАССЕЛЬ**, д-р-инж., **А. БЕНЬЯШ**, инж.

(Ин-т материаловедения Ганноверского ун-та им. Лейбница, Германия)

Исследовано влияние параметров режима сварки и свойств материала на формирование дефектов, таких как бугристость и подрезы, при вневакуумной электронно-лучевой сварке. Определено влияние отдельных параметров сварки на качество сварных швов.

*Ключевые слова:* вневакуумная электронно-лучевая сварка, скорость сварки, плотность мощности, защитный газ, дефекты сварных швов, бугристость, подрезы

В настоящее время современные технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) являются достаточно распространенным инструментом для обработки материалов. Одним из оригинальных видов ЭЛС является ЭЛС в открытой атмосфере (non-vacuum electron beam welding—NV-EBW), разработанная более 50 лет назад [1] и в основном применяющаяся в массовом производстве легких конструкций [2], в частности в автомобильной промышленности при сварке выхлопных систем, деталей трансмиссий и других компонентов [3, 4]. Этот процесс используют также при производстве сварных труб, при сварке широких горячекатаных полос и конструкционных сталей [5]. Основными преимуществами NV-EBW по сравнению с обычной ЭЛС в вакууме являются отсутствие необходимости создания вакуума в рабочей камере, высокая скорость сварки, малый рабочий цикл, хорошее перекрытие зазора сварных кромок лучом, высокий КПД оборудования. К недостаткам процесса можно отнести малое рабочее расстояние, образование рентгеновского излучения и озона, которые требуют защищенных от излучения помещений с вентиляционной системой.

\* По материалам доклада, представленного на V Международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов», 22–27 мая 2011 г., Казивели, Крым.

Благодаря большому резерву мощности теоретически можно достичь очень высоких скоростей сварки при NV-EBW тонколистовых металлов. Однако, как показывают работы [6, 7], интенсивная динамика сварочной ванны при высокой скорости сварки приводит к возникновению поверхностных дефектов сварных швов, особенно к бугристости (рис. 1, а) и подрезам (рис. 1, б). Данные дефекты наблюдаются при сварке стали на скоростях более 8 м/мин, а для алюминиевых сплавов — более 15 м/мин. Эти явления ограничивают использование полного потенциала мощности и экономической эффективности технологий NV-EBW.

**Экспериментальная установка.** Для экспериментальных исследований в Институте материаловедения использовали установку типа NV-EBW 25-175 TU компании «PTR-Precision technology» (рис. 2, б). Максимальная мощность луча этой системы составляет 25 кВт при ускоряющем напряжении  $U_{acc} = 175$  кВ, максимальная скорость сварки  $v_w = 20$  м/мин. Установка может работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме. Угол наклона электронной пушки может варьиро-

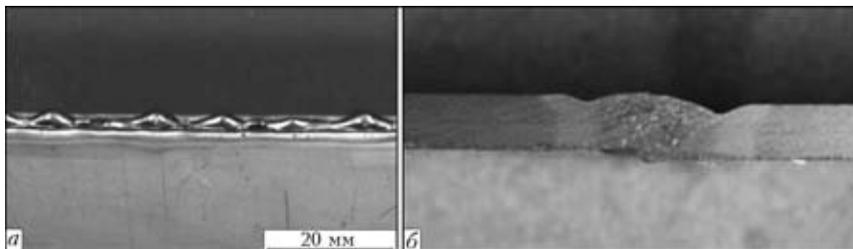


Рис. 1. Динамические дефекты сварных швов: а — бугристость ( $v_w = 10$  м/мин); б — подрез ( $v_w = 12$  м/мин)



ваться от 0 до 90° [5]. В Институте сварки и соединений в Аахене для экспериментальных исследований использовали оборудование компании «Steigerwald» (рис. 2, а). Максимальная мощность электронного луча данной системы составляет 30 кВт при ускоряющем напряжении  $U_{acc} = 150$  кВ, токе луча  $I_b = 200$  мА, максимально достигаемой скорости  $v_w = 57$  м/мин [4].

**Исследование и моделирование поверхностной динамики сварочной ванны.** Форма свободной поверхности сварочной ванны. На основании уравнения Навье–Стокса для течения расплава, уравнения непрерывности течения расплава и условий баланса давлений на свободной поверхности, как показано в работе [8], было выведено уравнение, описывающее форму поверхности сварочной ванны:

$$\frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} + \left( \frac{\rho v_0^2}{\sigma H} - \frac{2}{b^2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -\frac{3}{2LH} + 3v \frac{\rho v_0}{\sigma H^2}. \quad (1)$$

Обозначения параметров представлены на рис. 3.

Решив уравнение (1), можно определить превышение расплава над поверхностью образца в хвосте сварочной ванны:

$$\zeta|_{x=L} = \frac{-\frac{3}{2} \frac{H}{L} + 3 \frac{G}{Re}}{G - 2 \frac{H^2}{b^2}} \times \left[ L - 2H \frac{1 - \cos \left( G - 2 \frac{H^2}{b^2} \right)^{1/2} \frac{L}{H}}{\left( G - 2 \frac{H^2}{b^2} \right)^{1/2} \sin \left( G - 2 \frac{H^2}{b^2} \right)^{1/2} \frac{L}{H}} \right], \quad (2)$$

где  $G = (\rho v_0^2)/(\sigma/H)$  — отношение скоростного напора потока расплава к капиллярному давлению;  $v_0$  — скорость расплава относительно твердой фазы, связанная с обтеканием расплавом кратера, формирующегося под лучом, и в принятом одномерном приближении может быть оценена как  $v_0 = v_w \frac{h}{H}$ , где  $h$  — глубина кратера.

Уравнение (2) позволяет оценить влияние свойств материала и геометрии сварочной ванны на превышение сварного шва.

Рассмотрим случай «мелкой» и «широкой» сварочной ванны, когда  $G > (2H^2)/b^2$ , т. е. когда глубина проплавления меньше ширины сварочной ванны. В этом случае на поверхности расплава

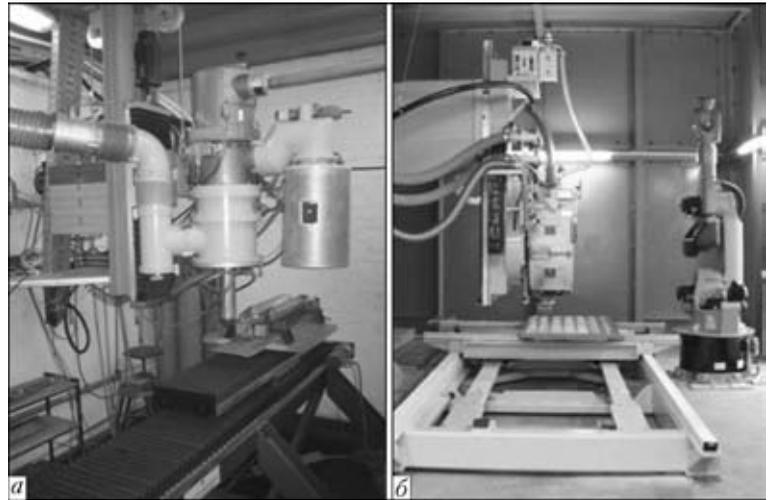


Рис. 2. Экспериментальные установки для ЭЛС в открытой атмосфере: а — Anlage Typ IGM G 150 K фирмы «Steigerwald»; б — 25-175 TU компании «PTR-Precision technology»

могут формироваться волны при  $(G - (2H^2)/b^2) L/H > 2\pi$ . При этом средняя линия поверхности снижается по направлению к хвосту ванны. В случае «глубокой» сварочной ванны, когда  $G < (2H^2)/b^2$  (глубина достигает трети ширины и более), ситуация кардинально меняется. Снижение средней линии сменяется ее повышением к концу ванны, максимальная высота которой может достигать  $\frac{3}{2} \frac{b^2}{H}$ . Следует обратить внимание на случай, когда  $G \approx (2H^2)/b^2$ . Тогда высота превышения может быть и существенно больше. Такие режимы наиболее опасны с точки зрения нестабильного формирования поверхности, но проанализировать это с использованием принятых приближений «пограничного слоя» невозможно.

Данная модель описывает форму сварочной ванны при относительно низких скоростях сварки (скорость сварки до появления бугристости и малых превышений шва  $\zeta$ ). Для экспериментальной верификации провели сварочный эксперимент с соответствующими параметрами. На полученном сварном шве наблюдается длинноволновой профиль сварочного валика (рис. 4).

Приведенный анализ является по сути теоретическим описанием процесса формирования «стационарных» занижений и превышений поверхности сварного шва, т. е. формирования подре-

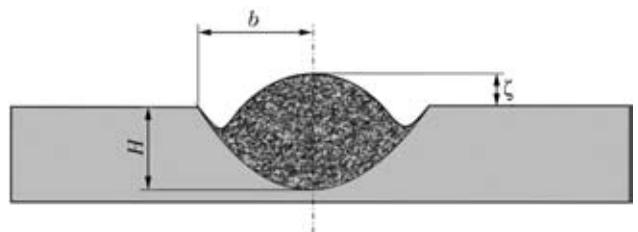


Рис. 3. Обозначение параметров сечения сварочной ванны

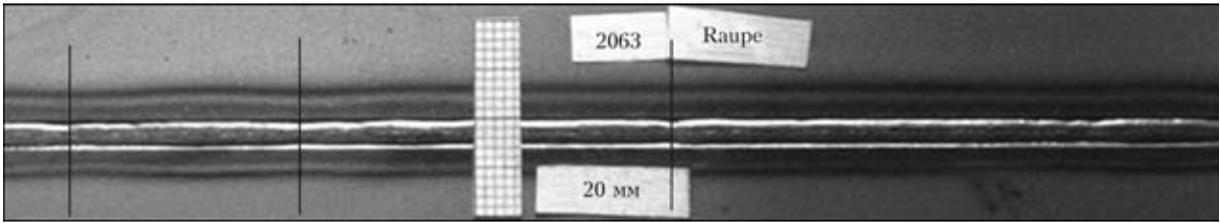


Рис. 4. Поверхность сварного шва при скорости сварки до появления бугров (DC05 толщиной 1,5 мм,  $v_w = 10$  м/мин,  $I_B = 70$  мА,  $A = 15$  мм)

зов. Для анализа существенно нестационарных явлений, таких как бугристость, в уравнениях необходимо сохранить «нестационарные» члены с временными производными и проанализировать устойчивость «квазистационарного» поведения, описанного выше.

*Устойчивость поверхности сварочной ванны.* Для анализа стабильности поверхности сварочной ванны использовали уравнение для локального превышения ее поверхности над поверхностью образца, выведенное на основе нестационарного уравнения Навье–Стокса, уравнения непрерывности и баланса давлений:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = -\frac{\sigma H \partial^4 \zeta}{\rho \partial x^4} + \frac{2\sigma H \partial^2 \zeta}{\rho b^2 \partial x^2} + \frac{3\sigma}{2\rho L H} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (3)$$

Обозначения, входящие в уравнение (3), показаны на рис. 5. Анализ устойчивости решения этого уравнения по Ляпунову (устойчивости плоской поверхности сварочной ванны) показал, что на поверхности сварочной ванны развиваются волны, описываемые выражением

$$\zeta = \zeta_0 e^{i(\omega t - kx)},$$

где  $\omega = \pm \Omega \pm i\gamma$  — круговая частота. Частота волн задается выражением

$$\Omega = \sqrt{\frac{\sigma H}{\rho}} \left[ \left( k^4 + \frac{2k^2}{b^2} \right)^2 + \frac{9k^2}{4L^2 H^4} \right]^{1/4} \times \cos \left( \frac{1}{2} \arctg \frac{3b^2}{2LH^2 k(k^2 b^2 + 2)} \right) \quad (4)$$

Инкремент нарастания волн  $\gamma$  определяется выражением

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sigma H}{\rho}} \left[ \left( k^4 + \frac{2k^2}{b^2} \right)^2 + \frac{9k^4}{4L^2 H^4} \right]^{1/4} \times \sin \left( \frac{1}{2} \arctg \frac{3b^2}{2LH^2 k(k^2 b^2 + 2)} \right) \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) определяют условия и скорость роста бугров. Поскольку в решение уравнения (3) всегда входят члены вида  $e^{i\omega t}$  и  $e^{-i\omega t}$ , то при любом знаке  $\gamma$  существует решение, возрастающее со временем. Это означает, что наличие

течения Марангони на поверхности приводит к возникновению на ней колебательной неустойчивости, которая является причиной бугристости. Параметры бугристости, такие как расстояние между буграми и их размер, определяются волновым числом  $k$  (длиной возбуждающихся волн), которое в свою очередь определяет максимальное значение инкремента  $\gamma$  (максимальную скорость роста возмущений). Таким образом, растут бугры с таким волновым числом, которое соответствует максимальной скорости роста (бугры с маленькой скоростью также растут, но их не видно из-за того, что большие бугры поглощают маленькие). При этом в силу конечности длины сварочной ванны  $L$  необходимо выбирать из значений  $k = 2\pi n/L$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots, m$ . Очевидно, что существует максимальное значение  $k$ , лежащее на вещественной оси, которое и определяет параметры бугристости.

Анализ выражения для инкремента нарастания волн показывает, что значение  $k$ , обеспечивающее максимум инкремента  $\gamma$ , при сделанных допущениях зависит только от длины, ширины и глубины сварочной ванны.

В качестве примера проанализируем процесс развития бугристости с увеличением скорости сварки. Возможные длины волн на поверхности сварочной ванны показаны на рис. 6 в виде вертикальных линий (маркеров). Скорости роста этих волн определяются соответствующими значениями инкремента нарастания волн. С увеличением скорости сварки, ведущим к удлинению сварочной ванны, все маркеры смещаются по графику налево, при этом скорости роста волн разной длины меняются и после перехода маркером наиболее длинной волны через максимум скорость ее роста

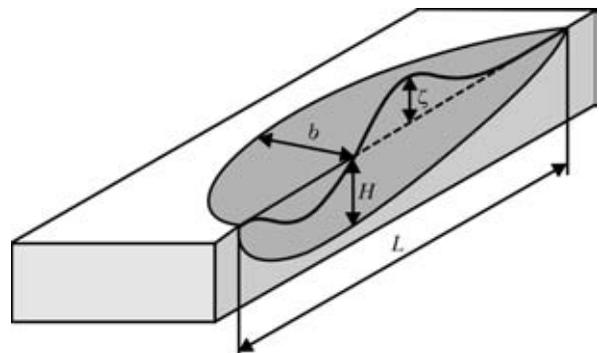


Рис. 5. Обозначения параметров к модели бугристости шва

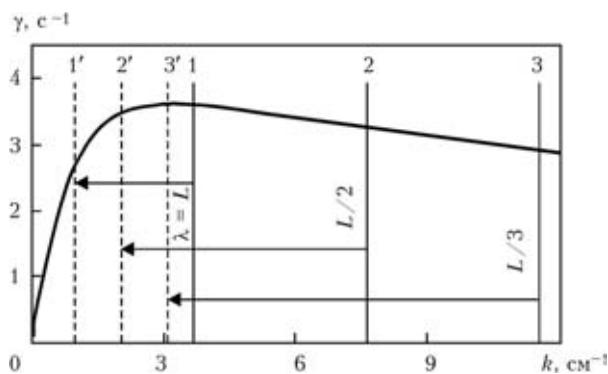


Рис. 6. Зависимость инкремента нарастания волн от волнового числа (описание см. в тексте)

начинает снижаться, что при дальнейшем увеличении скорости сварки ведет к замене длинноволновой бугристости на коротковолновую, т. е. к кратному уменьшению расстояния между буграми. Сплошные вертикальные линии на рис. 6 показывают волновое число для коротких сварочных ванн, штриховые — для длинных ванн. В длинной сварочной ванне растут быстрее короткие волны, в короткой — длинные.

Построенную модель можно проиллюстрировать реальным примером. Инкремент нарастания изменяется с увеличением длины сварочной ванны в соответствии с рис. 6. При экспериментах с короткой сварочной ванной (рис. 7, а) волна с  $\lambda = L$  находится правее максимума на графике, поэтому и растет быстрее. При длинной сварочной ванне волны с  $\lambda = L$  (рис. 7, б) смещаются в левую часть от максимума графика функции  $\gamma(k)$ , т. е. инкремент нарастания бугров с длиной волны  $L$  ниже, чем для волн длиной  $L/2$ .

**Экспериментальные исследования.** В соответствии с изложенной выше теорией основными параметрами, влияющими на появление сварочных дефектов, таких как бугристость, подрез, являются длина, глубина и ширина сварочной ванны. Их значения определяют пороговую скорость

сварки, при которой еще не наблюдаются дефекты, связанные с динамикой ванны.

*Определение критической скорости сварки при различных параметрах.* Результаты экспериментов, проведенные на низкоуглеродистой стали DC05, показали, что с увеличением скорости сварки сначала появляются подрезы, а при достижении определенной критической скорости для данных параметров сварки формируются первые крупные бугры с нерегулярными расстояниями между ними. С повышением скорости сварки возрастает количество бугров на длину шва, т. е. частота их появления увеличивается, расстояния между ними уменьшаются и размеры самих бугров становятся меньше (рис. 8).

Следующим важным параметром является рабочее расстояние  $A$ , которое влияет на плотность мощности в пятне нагрева. С уменьшением рабочего расстояния плотность мощности резко возрастает [9]. Результаты эксперимента показывают, что с уменьшением рабочего расстояния необходимо снижать ток луча с целью поддержания требуемой глубины проплавления металла. При этом шов получается уже и порог возникновения бугристости изменяется незначительно.

Определение границы возникновения бугров для различных материалов было проведено аналогично методике, примененной для стали DC05. Исследования показали, что существует определенная зависимость критической скорости сварки от свариваемого материала (табл. 1).

В то время, как порог скорости образования бугров для сталей находится в пределах 10...12 м/мин и несущественно зависит от их химического состава, при сварке алюминиевого сплава и свинца не наблюдалось бугристости даже при 20 м/мин. Очевидно, что порог скорости образования бугров зависит от физических свойств самого материала и прежде всего от поверхностного натяжения. Из табл. 1 видно, что с умень-

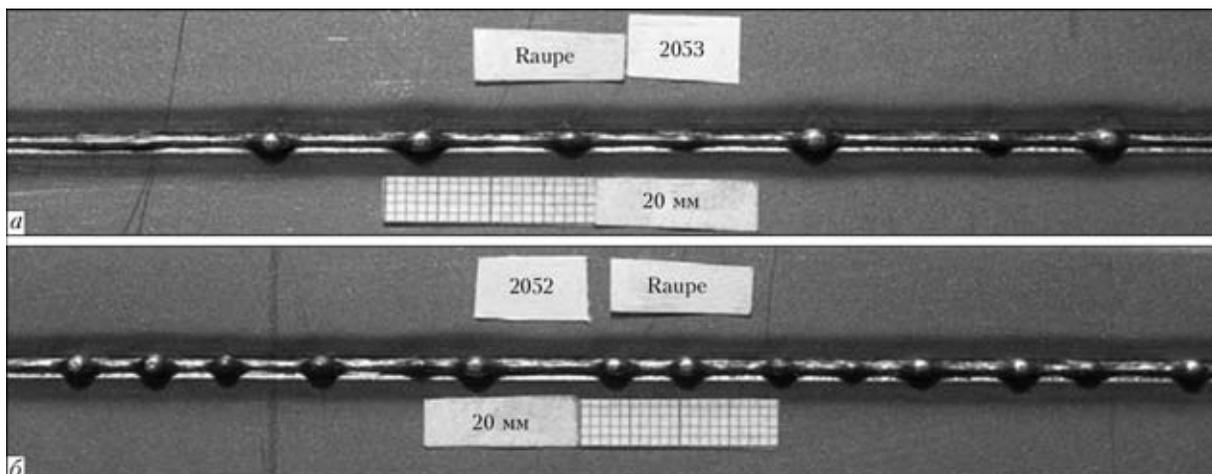


Рис. 7. Зависимость образования бугров от скорости сварки (соответственно от длины сварочной ванны) ( $A = 10$  мм): а —  $v_w = 12$  м/мин,  $I_B = 65$  мА; б —  $v_w = 15$  м/мин,  $I_B = 5$  мА

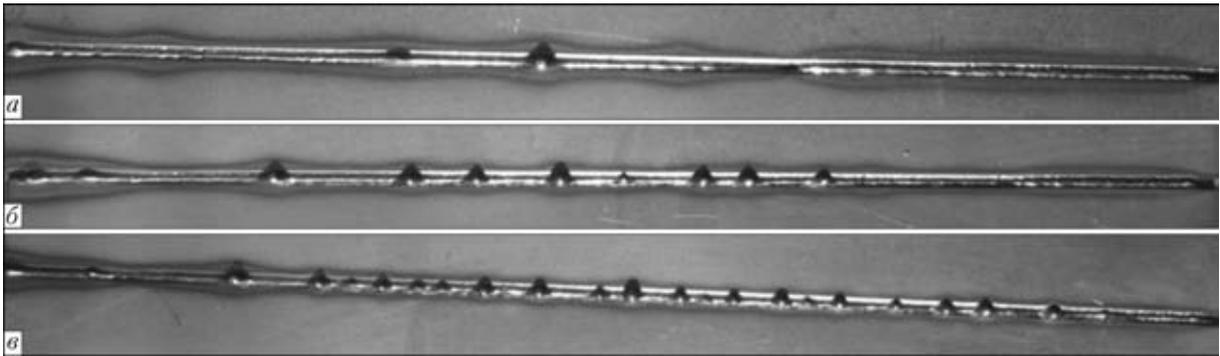


Рис. 8. Образование бугров и подрезов при разных скоростях сварки (сталь DC05,  $U_{acc} = 150$  кВ,  $I_B = 100$  мА,  $A = 10$  мм): а —  $v_w = 14$ ; б — 16; в — 18 м/мин

шением поверхностного натяжения порог бугристости сдвигается в область больших скоростей сварки, что подтверждает сделанное выше заключение о ведущей роли термокапиллярного эффекта при образовании бугристости в мелкой сварочной ванне. Косвенным образом это подтверждает зависимость порога бугристости от толщины материала. Результаты экспериментов по определению влияния толщины металла на динамику сварочной ванны представлены в табл. 2.

Установлено, что порог скорости образования бугров падает с увеличением

толщины материала. Это может быть объяснено изменением механизма теплопроводности в металлическом листе при переходе от двух- к трехмерному случаю. При этом меняется динамика сварочной ванны, на которую, помимо поверхностного термокапиллярного эффекта, влияют конвективные потоки со дна ванны к поверхности.

Поверхностно-активные вещества, такие как кислород при сварке сталей, действуют как элемент, понижающий силы поверхностного натяжения, причем согласно теории Рэлея [10] критическая длина ванны увеличивается ( $\lambda > 2\pi R$ ) и появление бугров можно избежать или отодвинуть их возникновение в сторону больших скоростей сварки. При снижении поверхностного натяжения увеличивается радиус, а с ним и критическая длина, т. е. ванна замерзнет раньше, чем возникнет волна. На рис. 9 показан пример влияния защитного газа состава  $Ag + 4\% O_2$  на формирование бугристости в нахлесточном соединении.

Исследования показали, что применение защитного газа позволяет увеличить скорость сварки на 2 м/мин прежде, чем возникнет бугристость.

Вывод о том, что эффект Марангони является решающим фактором для динамики сварочной ванны подтверждается также следующим экспериментом. Известно, что сера и углерод существенно влияют на поверхностное натяжение сва-

Таблица 1. Влияние типа материала на критическую скорость образования бугров ( $A = 15$  мм)

Материал	$d$ , мм	$v_w^*$ , м/мин	$\rho$ , Дж/см <sup>3</sup>	$I_B$ , мА	$\sigma^*$ , мН/м	Замечания
Сталь DC05	1,5	12	7,874	80	1800	Начало бугристости
Сталь TRIP 700	1,5	12	7,874	75	1800	»
Cu	1,5	15	8,920	68	1250	»
AlMg <sub>3</sub>	1,7	20	2,660	40	865	Бугристость не достигнута
Pb	1,0	20	11,34	12,5	451	»

\* Поверхностное натяжение чистых материалов (Fe, Cu, Al, Pb).

Таблица 2. Влияние толщины материала на порог скорости образования бугров шва ( $A = 15$  мм, расход гелия 90 мин<sup>-1</sup>)

Материал	$d$ , мм	$I_B$ , мА	$v_w^*$ , м/мин	Замечания
DC05	0,7	57	20	Нормальный шов
DC05	1,5	80	12	Подрез, бугристость
DC05	3,5	75	6	»
AlMg <sub>3</sub>	1,5	40	20	Малые подрезы
AlMg <sub>3</sub>	4,0	70	10	Подрез, бугристость
Pb	1,0	12,5	20	Малые подрезы
Pb	5,5	40	15	Подрез, бугристость

рочной ванны [11]. Исходя из этого, для экспериментов использовали графитовый распылитель, которым была покрыта половина металлической пластины. После сварочного прохода обнаружено, что на части пластины, не покрытой графитом, образовались бугры, в то время как на обработанной графитом части пластины бугры не наблюдались (рис. 10). Так как время, типичное для вневакуумной ЭЛС, очень короткое, влиянием диффузионных процессов можно пренебречь и исходить из чисто поверхностных эффектов.

Высокоскоростная видеосъемка сварочной ванны. В помощь высокоскоростной видеосъемки сварочной ванны, проведенной в рамках ис-

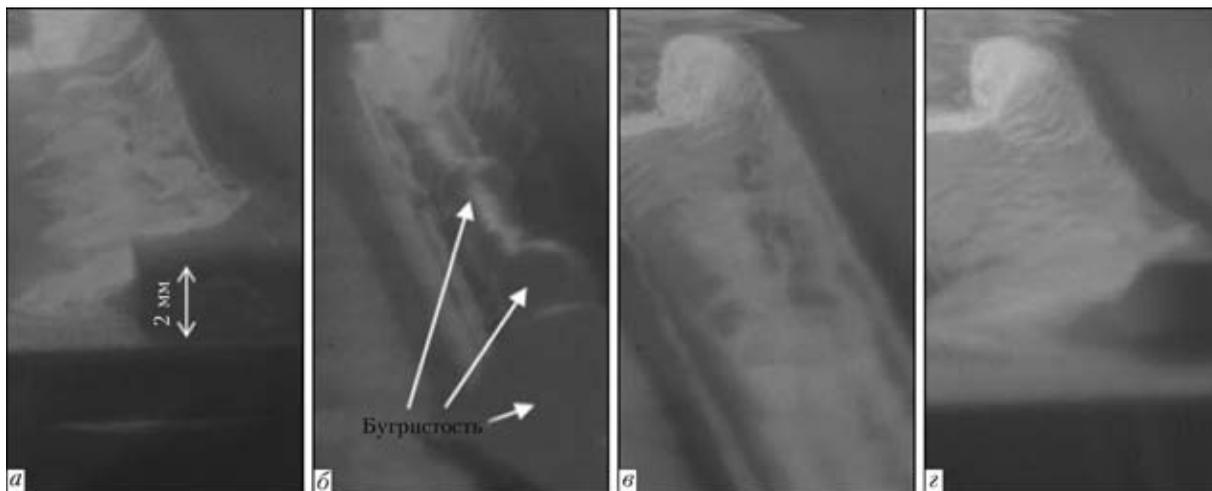


Рис. 9. Влияние защитного газа в нахлесточном соединении на образование бугров (сталь S420MC толщиной 2 мм,  $v_w = 10$  м/мин, кадры позади процесса сварки): а, б — без защитного газа; в, г — с защитным газом Ar + O<sub>2</sub>

следований во время процесса сварки (рис. 11), был зафиксирован поток расплава в направлении к хвосту сварочной ванны. Кроме того, можно наблюдать динамику развития отдельных бугров, их размеры и скорость роста (рис. 12).

Наблюдалось, что бугры имеют определенную скорость движения по отношению к поверхности свариваемой металлической пластины. Скорость движения бугров уменьшалась по мере их роста от порядка пяти скоростей сварки до скорости сварки. Средняя скорость течения расплава в середине сварочной ванны составила порядка 40 м/мин по отношению к поверхности пластины. Как показывают измерения, бугры сначала растут быстро. С увеличением размеров скорость их роста резко убывает. Измеренные данные были наложены численно на экспоненциальную функцию

$\Delta\gamma = ae^{-\gamma t}$ . В качестве среднего значения для затухающего роста бугров использовали параметр  $\gamma = 90 \text{ с}^{-1}$ . Далее на некоторых исследуемых кривых наблюдается сильное отклонение от непрерывного затухающего роста. Существуют отдельные бугры, которые на начальной стадии своего роста прекращают расти и рассасываются в объеме сварочной ванны. Происходит также поглощение малых неразвившихся бугров большими по размерам.

*Экспериментальное определение потоков расплава в сварочной ванне.* Для визуализации движения расплава в сварочной ванне использовали образец, который представлял собой две наложенные друг на друга металлические пластины толщиной 1 мм с тонкой никелевой полоской между ними, толщина которой составляла 100 мкм. По-

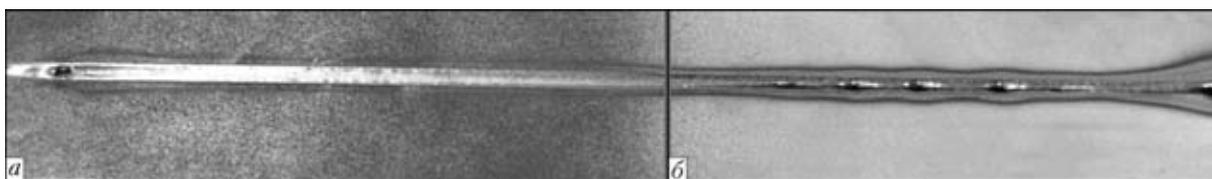


Рис. 10. Влияние поверхностно-активного вещества на динамику сварочной ванны (DC05 толщиной 1,5 мм,  $v_w = 14$  м/мин) с графитом (а) и без графита (б)

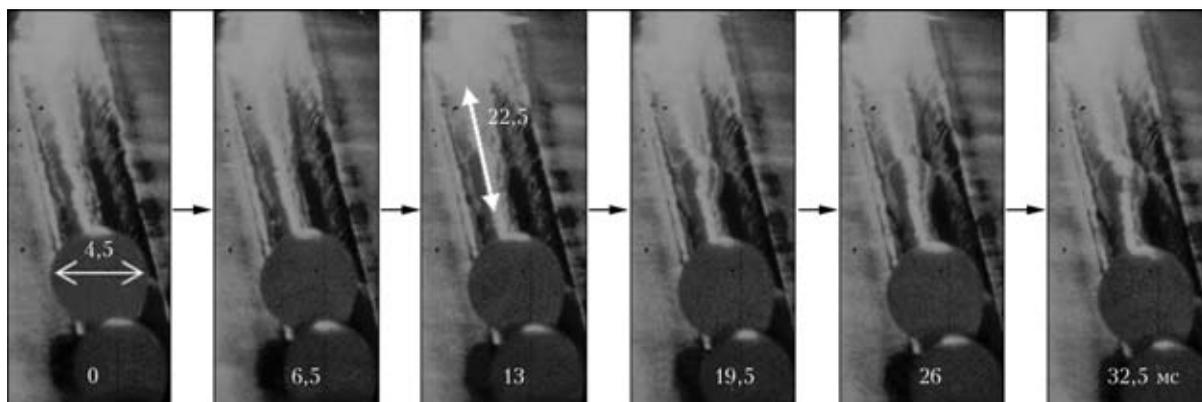


Рис. 11. Динамика роста бугров (высокоскоростная видеосъемка сварочной ванны)

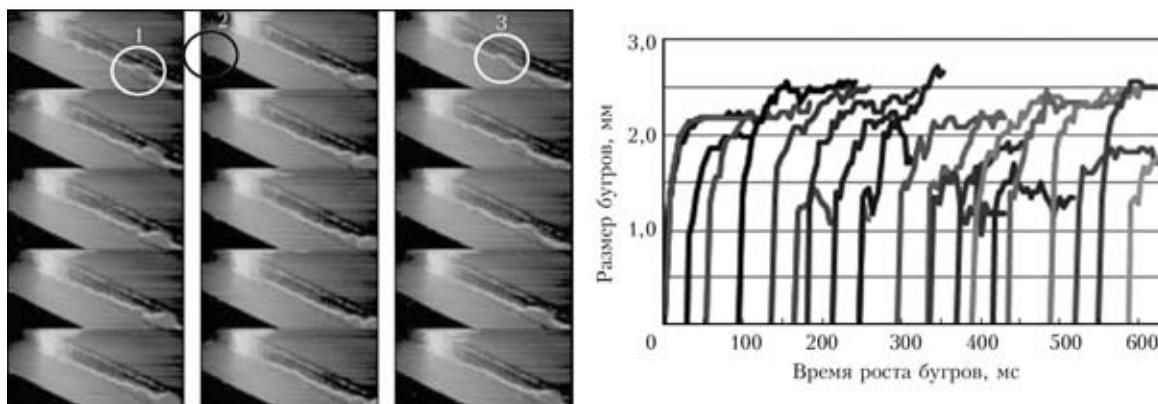


Рис. 12. Динамика роста бугров сварочной ванны (видео съемка в процессе сварки)

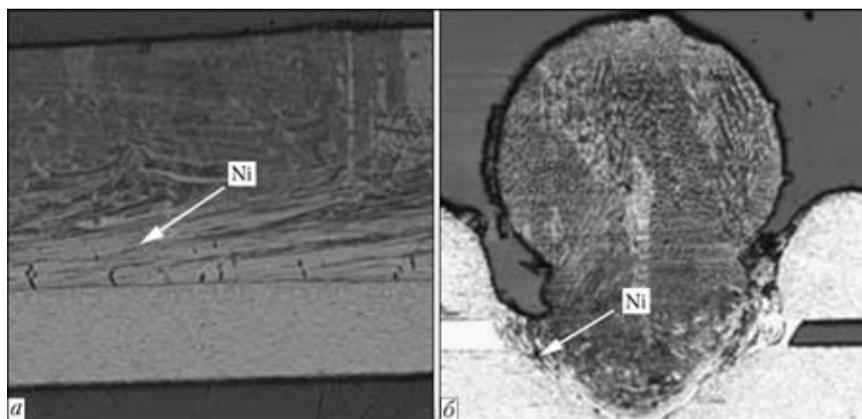


Рис. 13. Распределение никеля в сварном шве в отраженных электронах: *a* — продольное; *б* — поперечное сечение бугра

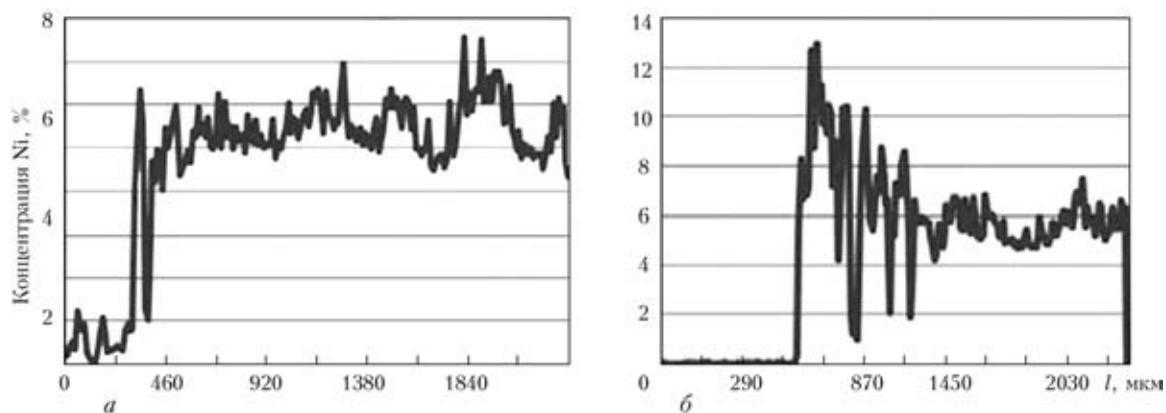


Рис. 14. Распределение никеля в бугре по горизонтали (*a*) и вертикали (*б*)

добные эксперименты проводили ранее на толстых материалах [12], где наблюдались вертикальные потоки жидкости в сварочной ванне. В наших экспериментах подобные вертикальные потоки не выявлены, а зафиксированы горизонтальные потоки индикаторного материала в корне шва (рис. 13).

Кроме оптического, металлографического исследования, проведен микрозондовый энергодисперсионный анализ (рис. 14), результаты которого не выявили градиента в концентрации никеля в сечении бугра как в продольном, так и в поперечном направлении.

Данные результаты представляют принципиально иную динамику формирования поверхности

сварочной ванны и свидетельствуют о том, что движущей силой в образовании бугров при сварке тонколистовых материалов являются не вертикальные конвекционные потоки, а поверхностные эффекты, прежде всего эффект Марангони.

### Выводы

1. На основе совместного исследования устойчивости гидродинамических и тепловых процессов в сварочной ванне разработана модель формирования подрезов и бугров на поверхности швов при вневакуумной ЭЛС. Теоретический анализ и результаты моделирования показали, что причиной формирования подрезов являются поверхностные



тные явления, а причиной возникновения бугров — развитие неустойчивости термокапиллярного течения расплава в сварочной ванне.

2. Определены пороги скорости бугрообразования и подрезов в зависимости от тока луча и рабочего расстояния. Установлено, что с увеличением тока луча возрастает нестабильность сварочной ванны. С уменьшением рабочего расстояния увеличивается интенсивность луча, поэтому ток луча необходимо уменьшать для поддержания требуемой глубины проплавления. При этом профиль шва становится уже и порог скорости бугрообразования изменяется незначительно.

3. Экспериментально определены пороги скорости образования бугров для различных материалов. С увеличением толщины материала порог скорости образования бугров уменьшается. Причиной этого является изменение условий тепло-массопереноса расплава. Установлено, что ведущую роль играет эффект Марангони.

4. Использование поверхностно-активных веществ позволяет подавить образование бугров за счет изменения коэффициента поверхностного натяжения.

5. Высокоскоростная видеосъемка позволила оценить скорость течения расплава в сварочной ванне, динамику роста и размеры отдельных бугров.

6. Благодаря использованию индикаторного материала никеля в сварочной ванне были выявлены горизонтальные потоки и отсутствие вертикальных, что было также подтверждено результатами микронзондового анализа шлифов в продольных и поперечных шлифах.

*Данная работа проведена в рамках проекта Di.434/88-1, LA 2484/1-1 при поддержке Deutsche Forschungsgemeinschaft.*

1. *Introduction to electron beam technology* / Ed. Bakish R. — New York; London: John Wiley & Sons Inc., 1962.
2. *Non vacuum electron beam welding of light sheet metals and steel sheets* / Fr.-W. Bach, A. Szelagowski, R. Verseemann, M. Zelt. — S. 4–10. — [2002]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. No. IV-823–02).
3. *Powers D. E., Schumacher B. W. Using the electron beam in air to weld conventionally produced sheet metal parts* // *Welding J.* — 1989. — 68/2. — S. 48–53.
4. *Diltthey U., Masny H. Hochgeschwindigkeitsschweißen mit dem Elektronenstrahl an Atmosphäre-Fertigung von Karosseriekomponenten.* — DVS-Berichte. Duesseldorf: DVS-Verlag, 2005. — Vol. 237. — 549 S.
5. *Вневакуумная электронно-лучевая сварка конструкционных сталей* / Ф.-В. Бах, А. Беньяш, К. Лай, Р. Конья // *Автомат. сварка.* — 2009. — № 5. — С. 29–34.
6. *Albright C. E., Chiang S. High speed laser welding discontinuities* // Proc. of the 7 th Intern. conf. on applications of lasers and electro optics. — ICALOE'88. Santa Clara CA, 1988. — P. 207/213.
7. *Wei P. S. Thermal science of weld bead defects: A review* // *J. of Heat Transfer.* — 2011. — Vol. 133.
8. *Dynamic processes at high speed laser and electron beam treatment of materials* / G. Turichin, E. Valdaytseva, Fr.-W. Bach, A. Beniyash // 25th Anniversary of cooperation, transactions of saint-petersburg state polytechnic university and Leibniz University of Hannover. — St. Petersburg–Hannover, 2010. — P. 91–101.
9. *Messung der Strahlqualitaet einer Elektronenstrahlanlage in Umgebungsatmosphaere* / U. Reisgen, M. Schleser, A. Abdurakhmanov, H. Masny // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.* — 2010. — 41, № 1. — S. 45–52.
10. *Rayleigh J. The theory of sound.* — New York: Dover publ., 1945.
11. *Czerner St. Schmelzbaddynamik beim Laserstrahl-Waermeleitungsschweißen von eisenwerkstoffen.* — Diss.: Hannover, 2005.
12. *Sievers E-R. Schmelzbadinstabilitaeten beim Elektronstrahlschweißen von Grobblechen* // *Schweißen und Schneiden.* — 2006. — 58, № 6. — P. 288–295.

The effect of welding process parameters and properties of materials on formation of dynamic defects, such as humping and undercutting, in non-vacuum electron beam welding was investigated. The impact of individual welding parameters on quality of the welds was determined.

Поступила в редакцию 07.07.2011

## Уважаемые читатели!

**20–24 февраля в пос. Свалява (Карпаты, Украина) состоится 12-й Международный научно-технический семинар «Современные проблемы производства в промышленности и на транспорте» с разделами: «Упрочняющие технологии и покрытия» и «Современные технологии и оборудование в сборочном и сварочном производстве» (АТМ Украины, тел./факс: +38 (044) 430 85 00, E-mail: atm@ism.kiev.ua).**