



БРОВКО
Андрей Викторович
(ОАО НПП «Салют»)

BROVKO
Andrey Viktorovich
(Moscow, Russian Federation,
FSUE «SMP «Salyut»)

Построение расчетной модели порообразования при сварке алюминия и его сплавов с использованием комплексного подхода

А.В. Бровко

В настоящее время существует несколько альтернативных технологических приемов дуговой сварки алюминия и его сплавов, но при этом отсутствуют сравнительные критерии оценки эффективности использования альтернативных технологических приемов применительно к конкретной технологии сварки и конструкции соединения. В технике известен комплексный подход, который широко используется в металлургической и химической отраслях для расчета замкнутых систем. Он основан на составлении уравнений материального и энергетического баланса рассматриваемого процесса. В статье рассмотрена модель порообразования при сварке алюминия с использованием комплексного подхода. Отличительной особенностью модели процесса образования пор при сварке алюминия является установление граничных условий условного замыкания процесса порообразования в пространстве и во времени. С помощью построенной модели оценена склонность к образованию пор различных технологических вариантов аргонодуговой сварки алюминия неплавящимся электродом. Результаты исследования будут полезны при разработке технологий сварки.

Ключевые слова: поры, сварка, сплав алюминия, комплексный подход, модель, материальный и энергетический баланс.

Developing a numerical model of pore formation during welding of aluminum and its alloys using a comprehensive approach

A.V. Brovko

Currently, there are several alternative technological methods for arc welding of aluminum and its alloys, but there are no comparative performance criteria for alternative processing methods as applied to a specific welding procedure and joint design. A comprehensive approach is widely used in the metallurgical and chemical industries for the calculation of closed systems. It is based on the mass and energy balance equations describing a process under consideration. This paper deals with a model of during aluminum welding based on a comprehensive approach. A distinctive feature of the pore formation model in welding aluminum is to establish boundary locking conditions for the pore formation process in space and time. The developed model was used to estimate the tendency to form

pores for various regimes of nonconsumable-electrode arc welding of aluminum. The results of the study will be useful in the development of welding techniques.

Keywords: pores, welding, aluminum alloy, comprehensive approach, model, material and energy balance.

Вопросам сварки алюминия и его сплавов посвящено значительное количество работ [1–3]. Для обеспечения качества сварных соединений используют разнообразные технологические приемы, например: химическое и катодное травление оксидной пленки перед сваркой, сварка на переменном токе, сварка обжатой дугой и т. д. Определены общие требования к сварочным материалам, окружающей среде, сварочному оборудованию, технологическим режимам сварки. Однако до сих пор вопросы порообразования при дуговой сварке алюминия и его сплавов остаются главной проблемой при сварке [4], особенно тонкого металла, что вынуждает при необходимости использовать более сложные способы сварки, например, электронно-лучевую и лазерную сварку [5, 6]. Принципиальная модель процесса, приводящего к образованию пор при сварке алюминия, хорошо известна и связана с разложением гидроксида оксидной пленки при попадании его в расплав. Последствием распада гидроксида является выделение пузырьков пара в расплав, успевающий кристаллизоваться до всплытия пузырьков [2]. Однако только с использованием расчетного метода представляется возможным установить количественные оценки влияния отдельных элементов технологии на этот процесс.

В этой связи актуальна задача выбора наиболее рациональной технологии сварки конкретных конструкций.

Поскольку сравнительный выбор рациональных технологий сварки алюминиевых сплавов и причин появления характерных дефектов — крайне трудоемкая задача, для ее решения целесообразно использовать современные методы исследований, в том числе оценку порообразования на расчетной модели. Так как алюминий является химически активным металлом, который при взаимодействии с кисло-

родом образует на своей поверхности пленку с особыми свойствами, то при выборе расчетного метода анализа было обращено внимание на широко известный и всеми признанный комплексный метод расчета процессов химических производств [7]. Однако указанный метод определяет только общий подход к расчету разных систем, поэтому он применительно к конкретному процессу сварки алюминия и его сплавов требует определенной адаптации.

Целью настоящей работы является рассмотрение применимости комплексного метода для построения расчетной модели порообразования при сварке алюминия и его сплавов.

В настоящее время комплексный метод используется в технике при расчете производственных процессов-систем. В металлургической и химических отраслях данный метод наиболее эффективен при расчете закрытых систем, при этом расчету могут быть подвергнуты также условно закрытые системы [7]. Под закрытой (замкнутой) системой понимается процесс (система), в котором отсутствует обмен с окружающей средой. Поскольку процессы сварки относятся к открытым системам, то для эффективного использования комплексного метода они должны быть условно приведены к закрытым системам с условным замыканием процесса по времени и пространству. При условном замыкании системы должны учитываться энергетические и материальные потоки, входящие в условно замкнутую систему и исходящие из нее. Схематично эта расчетная система представлена на рис. 1.

Расчет любой условно замкнутой системы основан на законах сохранения массы и энергии, представленных в математическом виде:

$$\sum E = 0; \quad (1)$$

$$\sum M = 0, \quad (2)$$

где E — энергетические потоки; M — материальные потоки.

Алгоритм расчета условно замкнутой системы и протекающие в ней процессы схематично представлены на рис. 2.

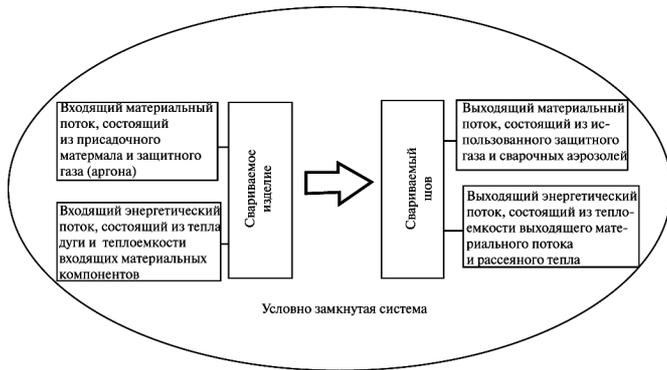


Рис. 1. Структурная схема условно замкнутой системы дуговой сварки

Рассмотрим особенности условно замкнутой системы дуговой сварки неплавящимся электродом алюминия. Для этого, в первую очередь, выделим материальные объекты, взаимодействующие со сварным швом в процессе сварки. Кроме основного металла со сварным швом взаимодействует оксидная пленка, газы воздуха и защитный газ.

Рассмотрим более подробно состав и свойства оксидной пленки, поскольку она является основным компонентом анализируемой системы. Принято рассматривать процесс образования оксидной пленки на алюминии как трехстадийный. На первой стадии образуется аморфная оксидная пленка толщиной 8...10 нм, на второй — кристаллографический бемит $Al(OH)_3$ ($Al_2O_3 \times H_2O$), на третьей — кристаллический байерит $Al_2O_3 \times 3H_2O$. При этом образовавшаяся на воздухе пленка толщиной 15...20 нм многослойна. В средней части ее состав близок к стехиометрическому составу Al_2O_3 , а к последнему слою оксида, неопределенного по стехиометрическому составу, примыкает гидроксид алюминия $Al(OH)_3$ и очень тонкий слой влаги и углеводов [1]. Таким образом, поверхность алюминия перед сваркой можно условно рассматривать, как покрытую оксидами алюминия разного состава с химически связанной и свободной влагой на его поверхности. Рассмотрим процессы, происходящие в оксидной пленке. Поведение свободной

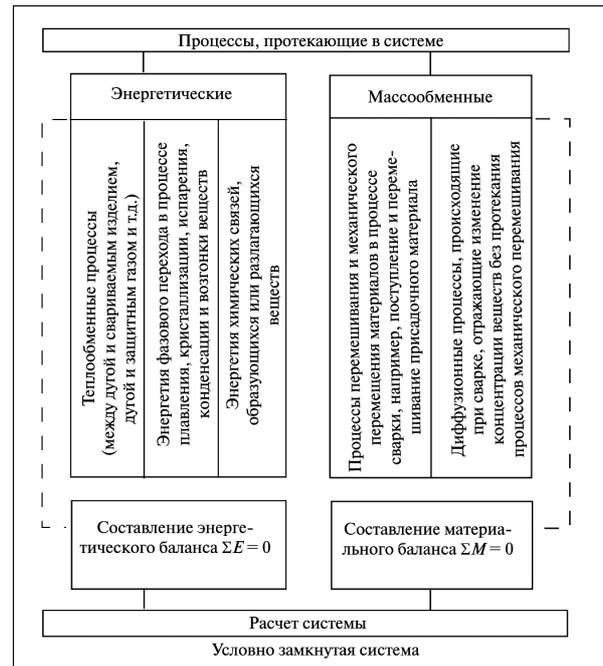


Рис. 2. Схема процессов и расчета условно замкнутой системы дуговой сварки

и химически связанной в гидроксид влаги при воздействии сварочной дуги будет различным. Свободная влага при нагреве мгновенно испарится без попадания в сварной шов и только увеличит содержание влаги в газовой атмосфере над поверхностью сварочной ванны. В то время когда гидроксид, обладая значительной термической стойкостью, способен привести к попаданию влаги даже в жидкий металл сварочной ванны. Термическое разложение гидроксида начинается при температуре выше 180 °С с образования бемита $AlOOH$ ($Al_2O_3 \times H_2O$) и заканчивается при температуре выше 1 000 °С образованием стабильной фазы — корунда ($\alpha-Al_2O_3$).

Попадание в сварной шов гидроксида приводит к образованию влагонасыщенных пор. Зарождение и развитие пор на границах жидкости и твердой фазы подробно рассмотрены в работе [8].

Для описания влияния поверхностей раздела и смачивания их жидкостью на зарождение пор используются следующие выражения [8]:

$$P_r = \left(\frac{[H]}{[H]_0} \right)^2 = p_6 + h\gamma + \frac{2\sigma_{ж.г}}{r_k} f(\theta);$$

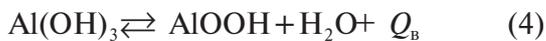
$$f(\theta) = \left(\frac{2 + 2\cos\theta + \sin^2\theta\cos\theta}{4} \right)^{1/3}; \quad (3)$$

где p_6 — барометрическое давление; h — глубина погружения пленки в жидкий металл; γ — удельный вес жидкого алюминия; $\sigma_{ж.г}$ — поверхностное натяжение на межфазной поверхности жидкого газа; r_k — критический радиус; θ — угол смачивания.

Образование пор в литом металле в результате разложения пленки, попавшей в шов, показано на рис. 3.

Зарождение пор на поверхности пленки при смачивании жидкостью пленки изображено на рис. 4.

Любой обратимый процесс требует специальных условий и определенного времени для его полного протекания. Термический распад гидроксида является обратимой реакцией и соответственно равновесие реакции зависит от концентрации продуктов реакции и для реакции неполного распада



описывается выражением

$$K = \frac{[\text{Al(OH)}_3]}{[\text{AlOON}][\text{H}_2\text{O}]}, \quad (5)$$

где Q_B — тепло, необходимое для распада гидроксида; K — коэффициент равновесия реакции распада; $[\text{Al(OH)}_3]$, $[\text{AlOON}]$, $[\text{H}_2\text{O}]$ — концентрации соответствующих веществ.

Как следует из выражения (5) увеличение количества H_2O как продукта реакции приводит к установлению равновесия и прекращению распада при данной температуре. Продолжение распада возможно только при дальнейшем повы-

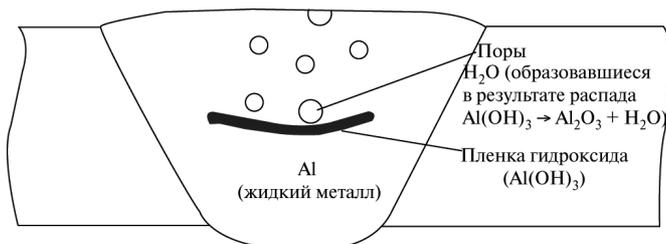


Рис. 3. Схема процесса образования пор в литом металле сварного соединения

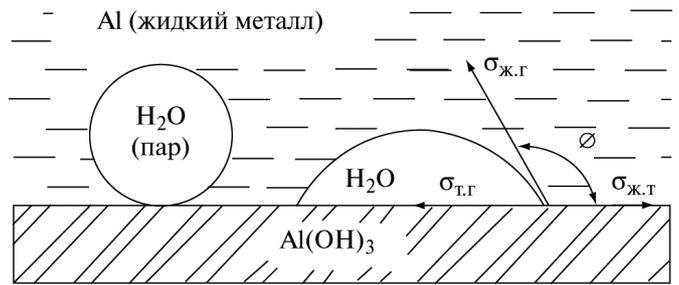


Рис. 4. Схема процесса зарождения и отделения влагосодержащих пор от гидроксидной пленки

шению температуры в процессе сварки. На степень превращения (распада) гидроксида оказывает влияние наличие влаги, как продукта распада, в газовой атмосфере над поверхностью ванны. Таким образом, свободная влага над поверхностью оксидной пленки также влияет на попадание влаги в расплавленный металл шва за счет сдерживания распада гидроксида.

Рассмотрим пример практического использования комплексного метода для оценки степени влияния различных технологических приемов на вероятность образования пор при сварке неплавящимся электродом алюминия и его сплавов. Для этого оценим энергетические и материальные процессы, происходящие в поверхностной пленке при сварке.

Энергетический баланс системы во многом аналогичен известному энергетическому балансу дуги и в общем виде может быть представлен следующим выражением:

$$Q_d - Q_m - Q_o - Q_r - Q_b - Q_n = 0, \quad (6)$$

где Q_d — тепло, вносимое сварочной дугой в систему; Q_m — тепло, передаваемое в нагреваемый металл; Q_o — тепло, передаваемое оксидной пленке; Q_r — тепло, передаваемое газу; Q_b — тепло, расходуемое на распад гидроксидов; Q_n — потери тепла.

Уравнение (6) может быть представлено в другом виде, где в левой части уравнения учтено поступающее извне тепло, а в правой — тепло, поглощаемое системой:

$$Q_d = Q_m + Q_o + Q_r + Q_b + Q_n. \quad (7)$$

Здесь Q_d определяется по закону Джоуля–Ленца; Q_m — по теплоемкости алюминия с учетом закона распределения тепла от движущегося

источника; Q_0 — по теплоемкости оксидной пленки с учетом толщины пленки и закона распределения тепла от движущегося источника; Q_r — по теплоемкости газа с учетом скорости его истечения; Q_b — тепло, затрачиваемое на распад гидроксида.

Энергия полного разложения гидроксида алюминия на оксид и воду соответствует 186,6 кДж/моль. Максимальное расчетное количество гидроксида на 1 см² поверхности при его плотности 2,4 г/см³ и толщине пленки 20 нм составляет $0,47 \cdot 10^{-7}$ моля. Для распада такого количества гидроксида необходимо затратить $3,97 \cdot 10^{-2}$ Дж/см².

Выбрав в качестве примера расчета следующий режим сварки алюминия: ток сварки 80 А, напряжение на дуге 10,5 В, скорость сварки 12 м/ч, толщина свариваемого металла 2 мм при ширине шва на уровне 5 мм, можно определить удельное вложение энергии на единицу поверхности шва. В результате расчета получаем $1,35 \cdot 10^2$ Дж/см², что примерно в 1 700 раз превышает энергию, которую необходимо затратить на распад расчетного количества оксидной пленки гидроксида. Поскольку с увеличением толщины свариваемого металла уменьшается соотношение объема оксидной пленки к объему расплавляемого металла, можно сделать вывод, что изменение энергетического баланса процесса (дуги) при сохранении скорости сварки не способно существенно повлиять на распад гидроксида в процессе сварки. Поэтому крайне важно при оценке влияния технологических факторов учесть особенности материальных процессов, происходящих при сварке.

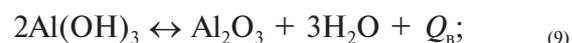
Рассмотрим материальный баланс влаги в поверхностной пленке. Согласно принципиальной модели процесса, приводящего к образованию пор при сварке алюминия, чем интенсивнее происходит разложение гидроксида оксидной пленки до попадания его в расплав, тем меньше вероятность образования пор в сварных швах.

Система, описывающая процесс выделения влаги при распаде поверхностной пленки, в общем случае может быть представлена достаточно простым уравнением материального баланса:

$$G_b = G_{\text{п}}, \quad (8)$$

где G_b — количество влаги в пленке гидроксида, распавшейся до попадания в литой металл; $G_{\text{п}}$ — количество влаги, перешедшей в пар и унесенного с газо-воздушной средой.

Из выражения (8) следует, что чем больше влаги перейдет в пар до попадания поверхностной пленки в расплав, тем меньше вероятность образования пор при сварке. По аналогии с выражениями (4) и (5) полный распад гидроксида описывается следующими выражениями:



$$K' = \frac{[\text{AlOOH}]}{[\text{Al}_2\text{O}_3][\text{H}_2\text{O}]}, \quad (10)$$

где K' — коэффициент равновесия реакции.

Как известно, скорость любой обратимой химической реакции зависит от температуры процесса и степени превращения. Поскольку реакции распада пленки (3) и (8) относятся к эндотермическим, скорость их возрастает с увеличением температуры процесса. В нашем случае мы ограничены началом плавления основного металла, за исключением специального технологического приема — катодного распыления. По мере увеличения степени превращения, чему соответствует состояние, близкое к равновесному, скорость реакции резко сокращается. Как следует из выражений (4) и (9) в случае принятия технологических мер по непрерывному удалению влаги (снижению $[\text{H}_2\text{O}]$) возможно удержание скорости реакции на высоком уровне. Таким образом, важно обеспечить технологические условия переноса влаги из гидроксида в пар и удалить последний из зоны сварки. Рассмотрим некоторые из этих условий, обеспечивающих максимальный вынос пара до начала расплавления:

- временной фактор;
- фактор влияния влажности защитного газа;
- геометрический фактор.

Временной фактор проявляется следующим образом: чем дольше тепловое воздействие сварочной дуги до начала процесса сварки, тем полнее происходит распад гидро-

ксида оксидной пленки, а при таком процессе, как катодное распыление, процесс распада гидроксида в пленке успевает произойти полностью, поскольку происходит термическое воздействие на пленку без расплавления основного металла.

Фактор влияния влажности защитного газа при сварке в принципе хорошо известен. Так, в работе [9] особое внимание уделено содержанию влаги в защитном газе и влиянию сорбированной на стенках газопровода подачи защитного газа влаги на вероятность образования пор при сварке.

Геометрический фактор имеет несколько проявлений. Чем толще пленка, тем хуже процесс сварки. Известно также неблагоприятное влияние слепого зазора на образование пор при сварке. В таком зазоре оксидная пленка не подвергается воздействию (распаду) до начала плавления и способна привести к образованию пор в сварном шве. Общая протяженность поверхности пленки также может повлиять на вероятность образования пор при сварке. Например, использование присадочного материала максимального диаметра может уменьшить в благоприятную сторону соотношение поверхностной пленки к объему расплавленного металла. При этом присадочная проволока большего диаметра в процессе своего оплавления должна находиться большее время в зоне дуги по сравнению с проволокой меньшего диаметра, что способствует лучшему распаду поверхностной пленки до попадания ее в сварной шов.

Таким образом, на основе комплексного анализа причин порообразования при сварке алюминия, примененного к известной модели, можно сделать сравнительный анализ технологий неплавящимся электродом алюминия и его сплавов.

Технология сварки с разделкой кромок при использовании приема катодного распыления предпочтительнее по сравнению со сваркой по слепому зазору без разделки кромок, поскольку позволяет максимально ограничить попадание гидроксидов в расплавленный металл. При этом диаметр присадочной проволоки следует выби-

рать максимально возможным и необходимо обеспечить максимально длительное воздействие тепла дуги на поверхность оплаиваемой присадки.

Комплексный метод может быть распространен на анализ других характерных особенностей процесса сварки алюминия, в первую очередь, на параметры химических реакций, происходящих в процессе сварки (оценка скоростей реакций и степени химических превращений), а также других процессов, например: анализа эффективности различных методов подготовки поверхности алюминия и его сплавов к сварке, оценки интенсивности перемешивания металла в сварочной ванне в зависимости от энергетических параметров процесса и т. д.

Выводы

1. Доказана возможность использования комплексного подхода при расчете процессов, происходящих при сварке. Процессы при расчете должны быть представлены в виде замкнутой или условно замкнутой системы. В ходе расчетов должны быть оценены энергетические и материальные процессы с составлением соответствующих балансов внутри расчетной системы.

2. Показано, что технология сварки с разделкой кромок при использовании приема катодного распыления предпочтительнее по сравнению со сваркой по слепому зазору без разделки кромок, при этом диаметр присадочной проволоки следует выбирать максимально возможным.

Литература

- [1] Редчиц В.В., Фролов В.А., Казаков В.А., Лукин В.И. *Пористость при сварке цветных металлов*. Москва, Технология машиностроения, 2002, 448 с.
- [2] Никифоров Г.Д. *Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов*. Москва, Машиностроение, 1972, 164 с.
- [3] Николаев Г.А., ред. *Сварка в машиностроении*. Т. 2. Москва, Машиностроение, 1978, 462 с.
- [4] Formation and Distribution of Porosity in Al-Si Welds by Pierre-Alexandre Legait. *A Thesis Submitted to the Faculty Of the Worcester polytechnic institute. In partial fulfillment of the requirements for the Degree of Masters of Science In Material Science and Engineering*. By May 2005.
- [5] Hidetoshi Fujii, Kiyoshi Nogi, Yasuhiro Aoki, Hideaki Umamashi. Bubble formation in aluminum alloy during electron beam welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 155—156, pp. 1252—1255.

[6] Левин Ю.Ю., Ерофеев В.А. Расчет параметров импульсной лазерной сварки алюминиевых сплавов малой толщины. *Сварочное производство*, 2008, № 4, с. 20—24.

[7] Belfiore L.A. *Transport phenomena for chemical reactor design*, Wiley, 2003, 886 p.

[8] Никифоров Г.Д. О замечаниях Л.С. Сапиро к статье «Влияние готовых поверхностей раздела на выделение растворенного газа». *Сварочное производство*, 1973, № 11, с. 55—57.

[9] Сушков В.Н., Крюковских В.Н., Жандарев А.П., Кудряшов О.Н., Дрянных А.Д., Мотсаренко А.И., Комаров Н.А. Влияние некоторых параметров атмосферы сварочного цеха на качество швов алюминиевых сплавов. *Сварочное производство*, 1976, № 6, с. 27—29.

References

[1] Redchits V.V., Frolov V.A., Kazakov V.A., Lukin V.I. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* [Porosity welding non-ferrous metals]. Moscow, Tekhnologiya mashinostroeniia publ., 2002. 448 p.

[2] Nikiforov G.D. *Metallurgiya svarki plavleniem aliuminievykh splavov* [Metallurgy of fusion welding of aluminum alloys]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1972. 164 p.

[3] *Svarka v mashinostroenii* [Welding in mechanical engineering]. Ed. Nikolaev G.A. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie publ., 1978. 462 p.

[4] Formation and Distribution of Porosity in Al-Si Welds by Pierre-Alexandre Legait. *A Thesis Submitted to the Faculty Of the*

Worcester polytechnic institute In partial fulfillment of the requirements for the Degree of Masters of Science In Material Science and Engineering. 2005.

[5] Hidetoshi Fujii, Kiyoshi Nogi, Yasuhiro Aoki, Hideaki Umatoshi. Bubble formation in aluminum alloy during electron beam welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 155—156, pp. 1252—1255.

[6] Levin Iu.Iu., Erofeev V.A. Raschet parametrov impul'snoi lazernoi svarki aliuminievykh splavov maloi tolshchiny [Calculation of the impulse laser welding condition of the smaller thickness aluminium alloys]. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding International]. 2008, no. 4, pp. 20—24.

[7] Belfiore L.A. *Transport phenomena for chemical reactor design*. Wiley-Interscience publ., 2003. 884 p.

[8] Nikiforov G.D. O zamechaniakh L.S. Sapiro k stat'e «Vliianie gotovykh poverkhnostei razdela na vydelenie rastvorenno go gaza» [About comments Sapiro L.S. to the article «The Effects of ready interfaces for release of dissolved gas»]. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding International]. 1973, no. 11, pp. 55—57.

[9] Sushkov V.N., Kriukovskikh V.N., Zhandarev A.P., Kudriashov O.N., Driannykh A.D., Motsarenko A.I., Komarov N.A. Vliianie nekotorykh parametrov atmosfery svarochnogo tsekha na kachestvo shvov aliuminievykh splavov [The influence of some parameters of the atmosphere welding shop on the quality of welds aluminum alloys]. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding International]. 1976, no. 6, pp. 27—29.

Статья поступила в редакцию 08.07.2013

Информация об авторе

БРОВКО Андрей Викторович (Москва) — инженер-технолог ОАО НПП «Салют» (111123, Москва, Российская Федерация, Плеханова ул., д. 6, e-mail: A.V.Brovko@yandex.ru).

Information about the author

BROVKO Andrey Viktorovich (Moscow) — Industrial Engineer of FSUE «SMP «Salyut» (Plekhanova str., 6, 111123, Moscow, Russian Federation, e-mail: A.V.Brovko@yandex.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография «Машины для правки труб. Конструкции, расчеты, исследования» автора И.С. Ротова.

В монографии изложена технология правки труб и прутков, представлены конструкции машин для ее осуществления, в том числе с одной трехвалковой обоймой, роторные и др.

Приведены формулы для расчета нагрузки на валки и крутящего момента их привода. Предложена методика расчета радиальной и угловой настройки валков, которая позволяет разработать вычислительные программы автоматизированного управления приводами правильной машины.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru