

Расчет и конструирование машин

УДК 621.791

Анализ влияния ширины зазора на образование пор при сварке алюминия и его сплавов с использованием комплексного подхода

А.В. Бровко, В.В. Бровко

Известно, что зазор влияет на склонность сварных соединений к образованию пор при сварке алюминия и его сплавов и его наличие способно снизить вероятность образования пор при дуговой сварке этих материалов. Однако до сих пор отсутствуют количественные оценки влияния ширины зазора на склонность к образованию пор. С использованием ранее созданной автором модели порообразования при сварке алюминия, основанной на использовании комплексного подхода, был выполнен расчет процессов, происходящих в пленке на поверхности алюминия, для различной ширины зазоров сварного соединения. Показано, что в процессе сварки в целом в зазоре резко увеличивается влажность газа, а это препятствует термическому разложению гидроксидов оксидной пленки и способствует образованию пор в процессе сварки. Установлена обратно пропорциональная зависимость концентрации продуктов распада гидроксидов оксидной пленки от ширины зазора. Обоснована необходимость использования конструкций сварных соединений с гарантированным зазором не только между стыкуемыми деталями, но и между свариваемой деталью и подложкой. Предложена конструкция стыкозамкового соединения и соединения на подкладке, обеспечивающие низкую склонность порообразования при сварке. Результаты исследования будут полезны при разработке конструкций соединений.

Ключевые слова: поры, гидроксид алюминия, сварка, оксидная пленка, сплав алюминия, комплексный подход, зазор, влажность.



БРОВКО
Андрей Викторович
(ОАО «НПП «Салют»)

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



БРОВКО
Виктор Васильевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

BROVKO
Viktor Vasil'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

Analysis of the influence of gap width on pore formation in welding aluminium and its alloys using a comprehensive approach

A.V. Brovko, V.V. Brovko

It is known that weld gaps influence pore formation when welding aluminium and its alloys. At the same time, the presence of gaps can reduce pore formation during the arc welding of these materials. Unfortunately, quantitative estimates of the influence of gap width on pore formation are still not available. In this paper, a model previously developed by authors, which is based on a comprehensive approach, is used to simulate the process of pore formation in a film on the surface of aluminium for different weld gap widths. It is shown that gas humidity sharply increases in the gap as a whole during welding, which prevents thermal decomposition of hydroxides in the oxide film and facilitates pore formation. In this case, the concentration of hydroxide decomposition products in the oxide film is inversely proportional to the gap width. It is recommended that structural welds should have gaps not only between joint parts but also between a work piece and a substrate. The designs of butt-interlocking and gasket joints providing low pore formation tendency during welding are proposed. The results of the study will be useful in the development of structural joints.

Keywords: pores, aluminium hydroxide, welding, oxide film, aluminium alloy, comprehensive approach, gap, humidity.

Существует ряд изделий из алюминия и его сплавов, к сварным соединениям которых предъявляются повышенные требования по содержанию пор в литом металле сварных соединений. Такими изделиями, например, являются волноводы радиолокационных станций. Проблема порообразования в данных сварных соединениях усугублена малой толщиной свариваемых изделий, когда практически любая пора может превышать установленные

предельные значения. Сварка плавлением алюминия и его сплавов, с одной стороны, является глубоко изученным и освоенным процессом, с другой стороны, именно склонность к порообразованию является отличительной особенностью алюминия и его сплавов [1, 2], что может привести при определенных неблагоприятных условиях к появлению недопустимых пор.

В работе [3] установлена четкая взаимосвязь ширины зазора с вероятностью образования дефектов при сварке алюминиевых сплавов и показано, что при недостаточной величине зазора оксидная пленка, содержащая гидриды, сохраняется вплоть до плавления металла и кристаллизации металла шва. Образование пор в металле шва происходит за счет влаги, выделяющейся из гидроксидов оксидной пленки, попадающей в сварной шов. При достаточной ширине зазора наблюдается разрушение оксидной пленки за счет действия дуги и механического разрушения пленки при встречном движении расплавленных кромок через зазор. Вместе с тем известно, что с увеличением влажности воздуха резко повышается вероятность появления пор, поэтому описанная модель не позволяет оценить влияние влажности воздуха на образование пор при сварке алюминия с зазором при аргонодуговой сварке (струйная защита инертным газом сварного шва). В этой связи представляют интерес количественные оценки влияния ширины зазора на вероятность образования дефектов при изменении параметров внешней среды.

Учитывая многофакторность влияния внешней среды, предлагается при количественной оценке вероятности возникновения дефектов использовать современные методы исследований, в частности, комплексный метод, адаптированный к модели порообразования при сварке алюминия [4].

Цель статьи — анализ процессов влагопереноса применительно к аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов при различных зазорах.

Комплексный метод в целом используется в технике при расчете производственных процессов-систем, в металлургической и химических отраслях промышленности [5, 6]. Особенностями применения этого метода к модели

порообразования при сварке алюминия является условное замыкание системы в пространстве и времени. Расчет комплексным методом основан на законах сохранения энергии и материи и построен на энергетическом и материальном балансе.

В общем виде комплексный метод расчета описывается следующими выражениями:

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

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

где E — энергетические потоки; M — материальные потоки.

Энергетические и материальные потоки, входящие в систему, принято рассматривать в уравнениях баланса как положительные (со знаком «+») потоки, выходящие из системы, принято рассматривать в уравнениях баланса как отрицательные (со знаком «-»). Важной особенностью этого метода при рассмотрении модели порообразования сварки алюминия является анализ нескольких стадий, характеризующихся различными физическими процессами на этих стадиях. Так, основными стадиями при адаптации метода к порообразованию при сварке алюминия являются:

- 1) нагрев поверхностной пленки алюминия от тепла дуги;
- 2) попадание пленки в расплав и образование пор в металле шва.

Общая схема аргонодуговой сварки неплавящимся электродом на примере стыкового соединения алюминиевых пластин, собранных с переменным зазором, охватывающая обе стадии процесса, представлена на рис. 1.

Известно, что причиной появления пор при сварке алюминия является образование влагонасыщенных пор вследствие распада в ванне жидкого металла (вторая стадия процесса) пленки, состоящей преимущественно из гидроксидов алюминия $Al(OH)_3$. Эта стадия непосредственно связана с первой стадией, на которой поверхностная пленка гидроксидов алюминия частично распадается под действием тепла дуги до ее попадания в расплав. Чем

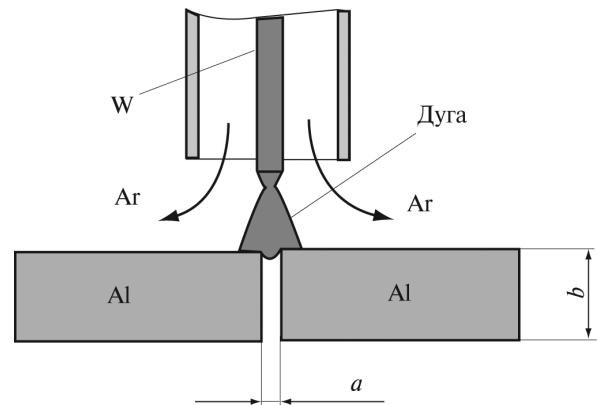


Рис. 1. Схема стыкового соединения, собранного под сварку:

a — ширина зазора; b — толщина свариваемого металла;
Al — свариваемые пластины;
Ar — защитный газ аргон; W — вольфрамовый электрод

больше степень распада, тем меньше порообразование будет происходить в сварных швах.

Поскольку зазор существует до момента сплавления кромок механизм, его влияние на процесс порообразования целесообразно рассматривать только на первой стадии процесса.

Исходя из представленной схемы аргонодуговой сварки и используя комплексный подход к расчету, можно выделить материальные компоненты системы, участвующие в процессе сварки (пленка гидридов алюминия, атмосферная влага, защитный газ (аргон)), и энергетические компоненты (теплоемкости материальных компонентов и тепло сварочной дуги). Схематично движение материальных компонентов представлено на рис. 2.

Известно, что основным источником влаги, поступающей в сварной шов при дуговой сварке алюминия в инертном газе, является оксидная пленка. Состав и свойства оксидной пленки хорошо изучены [2], однако процесс ее образования и распада необходимо рассмотреть более подробно.

Описание оксидной пленки. Процесс образования оксидной пленки на алюминии принято рассматривать как трехстадийный. На первой стадии образуется аморфная оксидная пленка толщиной 8...10 нм, на второй — кристаллографический бемит $Al(OH)_3$ ($Al_2O_3 \cdot xH_2O$), на третьей — кристаллический байерит $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$. При этом образовавшаяся на воздухе пленка толщиной 15...20 нм многослойна. В средней

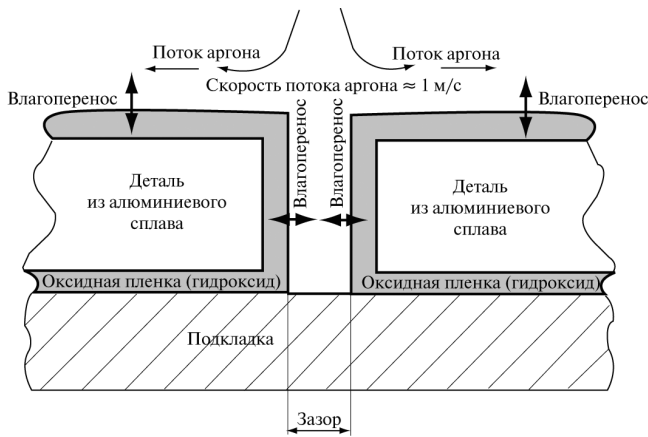


Рис. 2. Схема движения материальных компонентов в процессе сварки (толщина оксидной пленки показана условно)

части ее состав близок к стехиометрическому составу Al_2O_3 , а к последнему слою неопределенного по стехиометрическому составу слою оксида, примыкает гидроксид алюминия $Al(OH)_3$ и очень тонкий слой влаги и углеводов [3]. Таким образом, поверхность алюминия перед сваркой можно рассматривать, как условно покрытую оксидами алюминия разного состава с химически связанной и свободной влагой на его поверхности.

Процессы, происходящие в оксидной пленке под действием тепла дуги. Поведение свободной и химически связанной в гидроксид влаги при воздействии сварочной дуги различное. Свободная влага при нагреве мгновенно испаряется без попадания в сварной шов и только увеличивает 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 $180\text{ }^\circ\text{C}$ с образования бемита $AlOOH$ ($Al_2O_3 \times H_2O$) и заканчивается при температуре выше $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ образованием стабильной фазы — корунда ($\alpha\text{-}Al_2O_3$).

Как любой обратимый процесс он 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



описывается выражением

$$K = \frac{[Al(OH)_3]}{[AlOOH][H_2O]} \quad (2)$$

Как следует из выражения (2) увеличение количества H_2O как продукта реакции приводит к установлению равновесия и прекращению распада при данной температуре. Продолжение распада возможно только при дальнейшем повышении 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 на поверхности оксидной пленки также влияет на попадание влаги в расплавленный металл шва.

Газовая среда. Рассмотрим следующий компонент системы — газовую среду с точки зрения содержания в ней влаги. Традиционно для оценки влажности газа (воздуха) используются известные параметры: абсолютная влажность (соответствует удельному весу пара в воздухе), относительная влажность (выражается в процентах) и температура воздуха. При этом существует взаимосвязь между тремя этими параметрами — любой из этих параметров может быть оценен с помощью двух других. Связь абсолютной и относительной влажности окружающего воздуха для конкретной температуры описывается известным выражением

$$\varphi = \gamma_n / \gamma_n^* \quad (3)$$

где φ — относительная влажность; γ_n — удельный вес пара в газе (воздухе); γ_n^* — удельный вес насыщенного пара в газе (воздухе).

Удельный вес пара может быть определен по формуле

$$\gamma_n = G_n / V_r \quad (4)$$

Здесь G_n — вес паров воды; V_r — объем газа, содержащий пары воды.

Существуют таблицы значений удельного веса насыщенного пара для атмосферного воздуха [7], в которых это значение определено в зависимости от температуры и относительной влажности.

Поскольку поверхность изделия соприкасается с газовой средой, между ними происходит влагоперенос. В процессе сварки осуществляется разогрев окружающей среды, поэтому в анализируемой нами системе имеет смысл рассмотреть

только процесс испарения влаги и диссоциации гидроксидов в результате нагрева. Диссоциация гидроксида, содержащегося в оксидной пленке, подчинена выражениям (1) и (2).

Испарение свободной влаги с поверхности подчинено законам диффузии и соответственно движущей силой процесса является концентрация компонентов. При достижении предельной концентрации паров процесс испарения прекращается ($\gamma_{\text{п}} = \gamma_{\text{н}}$). При этом, если над поверхностью находится значительный объем газа, в котором не достигается предельная концентрация паров, испарение влаги подчинено законам диффузии. Так, скорость диффузии, определяемая как количество вещества, продиффундировавшего через единицу поверхности за единицу времени, описывается выражением

$$\frac{dG}{Fd\tau} = -D \frac{dc}{dx}, \quad (5)$$

где $\frac{dG}{Fd\tau}$ — отношение количества вещества dG , продиффундировавшего через единицу поверхности F за единицу времени τ ; D — коэффициент диффузии; dc — уменьшение концентрации с увеличением расстояния dx от поверхности. При этом коэффициент диффузии сильно зависит от температуры процесса. Процесс испарения — это эндотермический процесс, так как требует затрат энергии, что должно быть учтено в реальной модели процесса.

На основе проведенного анализа расчетная система, представленная на рис. 1, по времени и происходящим процессам может быть разделена на две системы. Первая система включает в себя стадию нагрева от тепла дуги до начала плавления металла, вторая система — стадию плавления металла.

Внешний вид первой системы соответствует рис. 1 и характеризуется движением защитного газа над поверхностью деталей. Газ выходит из сопла горелки со скоростью порядка 1...2 м/с. В зазоре между свариваемыми пластинами находится газ, который при сварке замкнутого объема или сварке на подкладке практически неподвижен. Для замыкания системы в пространстве расчет целесообразно вести только на участке переплавляемого металла на едини-

цу длины шва. Для замыкания системы по времени расчет следует вести на единицу времени.

Энергетический баланс системы в общем виде может быть представлен следующим выражением:

$$Q_{\text{д}} - Q_{\text{м}} - Q_{\text{о}} - Q_{\text{г}} - Q_{\text{в}} = 0, \quad (6)$$

где $Q_{\text{д}}$ — тепло, вносимое сварочной дугой в систему; $Q_{\text{м}}$ — тепло, передаваемое в нагреваемый металл; $Q_{\text{о}}$ — тепло, передаваемое оксидной пленке; $Q_{\text{г}}$ — тепло, передаваемое газу; $Q_{\text{в}}$ — тепло, расходуемое на десорбцию влаги. Поскольку величины $Q_{\text{о}}$ и $Q_{\text{в}}$ по сравнению с другими компонентами малы, можно сделать вывод, что интенсивность выделения влаги из оксидной пленки при нагреве практически не влияет на процесс нагрева при сварке. Значительное превышение тепла, вносимого дугой над теплоемкостью процессов, происходящих в оксидной пленке, создает условия для протекания реакции (1) в направлении распада гидроксида. Исходя из изложенного, следует, что система, описывающая процесс выделения влаги при сварке, может быть достаточно достоверно описана только уравнением материального баланса:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{п}}. \quad (7)$$

Здесь $G_{\text{в}}$ — количество влаги, выделенной из оксидной пленки; $G_{\text{п}}$ — количество влаги, перешедшей в пар.

В расчетной системе выделяется две подсистемы: одна система включает в себя свариваемую поверхность, обдуваемую защитным газом; другая ограничена зазором, где движение газа незначительно. В обдуваемой поверхности в процессе массопереноса (газ поступает через горелку) участвует большой объем газа. В зазоре, закрытом с обратной стороны, конвекции газа практически не происходит и поэтому выделение поверхностной влаги и разложение гидроксидов оксидной пленки протекает в очень ограниченном объеме зазора. Каждая из подсистем может быть рассчитана по формуле (9).

Так, расчетная оценка первой подсистемы показывает возможность выделения из оксидной пленки влаги со скоростью $(2...10) \cdot 10^{-7}$ г/с, что при комнатной температуре (20 °С) обуславливает повышение относительной влажно-

сти защитного газа (расход защитного газа 8...10 л/мин) на 0,01...0,04 % и составляет ничтожно малую величину.

Расчет второй подсистемы основан на объеме газа в зазоре (рис. 3):

$$V = abl, \quad (8)$$

где a — ширина зазора; b — толщина свариваемого металла; l — длина шва.

Концентрация пара в зазоре может быть оценена выражением

$$\gamma_3 = \gamma_{п.з} + d\gamma_{п.з}. \quad (9)$$

При этом

$$d\gamma_{п.з} = \frac{2t\rho}{a}. \quad (10)$$

Здесь $d\gamma_{п.з}$ — увеличение удельного веса пара в газе зазора; a — ширина зазора; t — толщина слоя влаги, сорбированной на поверхности свариваемых пластин; ρ — удельная масса воды.

Выполненный на основе выражений (9) и (10) расчет из предположения, что толщина слоя влаги равна 20 нм [3], показал следующие результаты:

Ширина зазора, мм	0,05	0,1	0,2	0,4
Увеличение удельного веса пара в газе зазора, г/м ³	800	400	200	100

Поскольку удельный вес насыщенного пара при кипении воды (100 °С, атмосферное давление) составляет примерно 600 г/м³, можно наглядно оценить влияние ширины зазора на вероятность образования пор при сварке алюминия. Расчет показывает, что при недостаточной ширине зазора создаются условия для образования пор при сварке алюминия за счет сорбированной на его поверхности влаги.

Полученный путем расчетов результат дополняет механизм влияния величины зазора на порообразование при сварке алюминия, описанный Г.Д. Никифоровым. При повышении влажности газа в недостаточно широком зазоре, согласно зависимости (2), создаются условия, препятствующие разложению гидроксида при сварке вплоть до начала плавления металла. После образования сварочной ванны (система будет соответствовать ранее описанной в этой работе второй расчетной подсистеме, когда поверхность жидкого металла обдувается

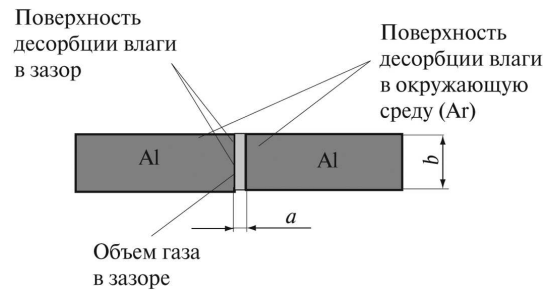


Рис. 3. Схема выделения влаги с поверхностей свариваемых деталей при нагреве в процессе сварки:

a — ширина зазора; b — толщина свариваемого металла

большим количеством сухого защитного газа — аргона) газ из зазора смешивается с защитным газом в результате чего давление пара над сварочной ванной резко уменьшается и возникают условия для выхода влаги из остатков оксидной пленки в жидкий металл с образованием пор в литом металле шва.

Так, исходя из описанного механизма повышения влажности в зазоре, дополнительно обоснована рекомендация Г.Д. Никифорова об использовании зазора при сварке и необходимости выполнения проточки в подложке (замке) при сварке алюминия (рис. 4). Конечно, увеличение ширины зазора создает условие, при котором более интенсивно происходит разложение пленки на торцах деталей под действием излучения дуги, проникающего на торцы. Однако только описанный в настоящей работе механизм обосновывает почему рекомендуемый Г.Д. Никифоровым [3] зазор между свариваемой деталью и подложкой уменьшает вероятность образования пор в металле шва при сварке.

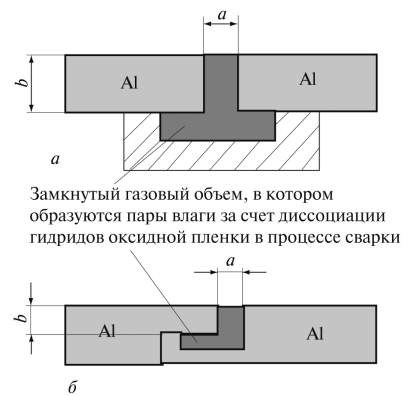


Рис. 4. Схема сварных соединений с зазором:

a — стыковое соединение на подкладке;
 b — замковое соединение; a — ширина зазора;
 b — толщина свариваемого металла

Полученный в ходе настоящей работы результат демонстрирует также преимущества стыковых сварных соединений, выполняемых на весу, обеспечивающих сквозной проток газа через зазор, в сравнении с соединениями на подкладке, а также соединениями, предназначенными для герметизации замкнутых объемов.

Выводы

1. При расчете процессов, происходящих при сварке, можно использовать комплексный подход. Процессы при расчете должны быть представлены в виде замкнутой или условно замкнутой системы. Показано, что при изменении геометрических, термодинамических и других факторов (на примере сплавления металла в зазоре) расчетная система может приобрести новый вид.

2. С использованием комплексного подхода проведены расчетные оценки влияния величины зазора на интенсивность процесса термического разложения оксидной пленки на сплавах алюминия при сварке плавлением.

3. Установлено, что использование сборки сварных соединений с гарантированным зазором, в том числе и между свариваемой деталью и подложкой, на алюминии и его сплавах значительно снижает вероятность образования пор при сварке. Ограничение объема газа, контактирующего с поверхностью свариваемого металла, препятствует термическому разложению гидроксидов оксидной пленки и приводит к попаданию гидроксидов в литой металл шва, где при дальнейшем разложении гидроксидов происходит образование пор в литом металле шва.

4. Установлено, что концентрация влаги как продукта распада поверхностной пленки находится в обратно пропорциональной зависимости от ширины зазора, а степень распада поверхностной пленки при нагреве в процессе сварки — в прямой зависимости от ширины за-

зора. Соответственно, чем больше зазор, тем сильнее разлагается поверхностная пленка до попадания ее в шов.

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] Legait P.-A. Formation and Distribution of Porosity in Al-Si Welds. *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*. May 2005.
- [3] Никифоров Г.Д. *Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов*. Москва, Машиностроение, 1972, 264 с.
- [4] Бровко А.В. Построение расчетной модели порообразования при сварке алюминия и его сплавов с использованием комплексного подхода. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 10, с. 56–62.
- [5] Касаткин А.Г. *Основные процессы и аппараты химической технологии*. Москва, Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961, 882 с.
- [6] Belfiore L.A. *Transport phenomena for chemical reactor design*. Wiley, 2003, 886 p.
- [7] Вукалович М.П. *Теплофизические свойства воды и водяного пара*. Москва, Машиностроение, 1967, 161 с.

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] Legait P.-A. Formation and Distribution of Porosity in Al-Si Welds. *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.
- [3] Nikiforov G.D. *Metallurgiya svarki plavleniem aluminievyykh splavov* [Metallurgy of fusion welding of aluminum alloys]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1972. 264 p.
- [4] Brovko A.V. Postroenie raschetnoi modeli poroobrazovaniia pri svarke aluminia i ego splavov s ispol'zovaniem kompleksnogo podkhoda [Developing a numerical model of pore formation during welding of aluminum and its alloys using a comprehensive approach]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2013, no. 10, pp. 56–62.
- [5] Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technologies]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo khimicheskoi literatury publ., 1961. 832 p.
- [6] Belfiore L.A. *Transport phenomena for chemical reactor design*. Wiley, 2003. 886 p.
- [7] Vukalovich M.P. *Teplofizicheskie svoystva vody i vodianogo para* [Thermo-physical properties of water and steam]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1967. 161 p.

Статья поступила в редакцию 08.07.2013

Информация об авторах

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

БРОВКО Виктор Васильевич (Москва) — кандидат технических наук, зав. лабораторией технологии и сварки «Научно-учебный центр «Сварка и контроль». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vvbrovko@mail.ru).

Information about the authors

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

BROVKO Viktor Vasil'evich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Head of Technology and Welding Laboratory at Research and Training Center «Welding and Control». Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: vvbrovko@mail.ru).