

Абашкин Е.Е., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Ткачева А.В. Влияние теплового режима совместного электродугового и алюмотермического воздействия на формирование структуры и свойств наплавляемого металла // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 62–74. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.08

Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N., Tkacheva A.V. Influence of the thermal mode at joint arc and aluminothermic impact on formation of structure and properties of built-up metal. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 62–74. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 2, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.08
УДК 621.791:620.17

Е.Е. Абашкин, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.В. Ткачева

Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Комсомольск-на-Амуре, Россия

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СОВМЕСТНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО
И АЛЮМОТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ
СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЯЕМОГО МЕТАЛЛА**

Значительными конкурентными преимуществами обладают предприятия, применяющие технологии с низким потреблением ресурсов при получении металлоизделий конструкций, важнейшим критерием оценки качества которых является долговременная эксплуатационная прочность. Разрабатываемая технология направлена на восстановление эксплуатационных характеристик стальных деталей (в том числе протяженных, имеющих признаки износа) наплавкой металла на их поверхности. Процесс осуществляется в результате локального нагрева стальной детали совместным применением энергии электродугового и алюмотермического воздействий. Недостаток информации о таком процессе, структурах и свойствах получаемой наплавки и ее соединения с материалом детали определяет актуальность и востребованность результатов исследований. Основной целью работы является определение теплового режима такого воздействия в зоне наплавки металла на стальные элементы конструкции, при котором достигаются требуемые геометрические, структурные и прочностные характеристики получаемого изделия.

Локальный нагрев в рассматриваемом процессе можно обеспечить при помощи подвода к поверхности изделия тепла, возникающего в результате совместного электродугового и алюмотермического воздействия от протяженного стержня-электрода, состоящего из стальной длинномерной оболочки, в которой заключен термитный наполнитель. Последний представляет собой смесь фракций оксида железа, восстановителя и добавок. Эти материалы являются отходами предприятий машиностроительного и металлургического комплекса, утилизация которых затруднительна. Процесс позволяет обеспечить возврат этих материалов в производство. Основными целями использования термитного материала, заполняющего полость протяженного сердечника, являются регулирование температуры и поставка металла в зону наплавки получаемого материала на поверхность детали-основы. Шлак, образующийся в результате алюмотермической составляющей теплового воздействия на ванну расплава, замедляет скорость отведения тепла от последней. Температурное воздействие на участок контакта наплавляемого материала с основой регулируется силой тока, напряжением и временем их пребывания в зоне термического влияния. После кристаллизации проводится химический анализ материала наплавки, определяются структура, прочностные и размерно-геометрические параметры получаемого изделия.

В ходе эксперимента установлено соответствие химического состава наплавляемого металла в зоне термического влияния материалу основы, выполненной из СтЗсп, соответствующей ГОСТ 380–2005. Сравнением традиционных структур со структурами, полученными экспериментальным способом, установлен ряд незначительных различий. Определены параметры теплового воздействия на участок соединения наплавляемого металла с основой, при которых оно соответствует требуемым прочностным и размерно-геометрическим характеристикам.

Ключевые слова: переработка отходов машиностроения, электродуговое воздействие, термитная смесь, химический состав, тепловое воздействие, зона термического влияния, структура, размерно-геометрические характеристики, алюмотермия, наплавка.

E.E. Abashkin, S.G. Zhilin, O.N. Komarov, A.V. Tkacheva

Institute of Machinery and Metallurgy of the Far-Eastern Branch Russian Academy of Sciences,
Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

**INFLUENCE OF THE THERMAL MODE AT JOINT ARC AND ALUMINOTHERMIC IMPACT
ON FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF BUILT-UP METAL**

The enterprises applying technologies with low consumption of resources when receiving metalwares designs most of which important criterion for evaluation of quality is nonvolatile operational durability have considerable competitive advantages The developed technology is

directed to recovery of operational characteristics of steel details, including extended, having signs of wear, a metal building-up on their surface. Process is realized as a result of local heating of a steel detail by combined use of powers of arc and aluminothermic influences. The lack of information on such process, structures and properties of the received building-up and its connection with parts material defines relevance and demand of results of researches. The main purpose of work is definition of the thermal mode of such impact on a zone of metal building-up of steel elements design at which the required geometrical, structural and strength characteristics received product are reached.

Local heating in the considered process can be provided by means supply to a surface of product of heat resulting from joint arc and aluminothermic influence from the extended core electrode (CE), that consists from steel lengthy cover in which thermite filler is concluded. The last represents mix of fractions of oxide of iron, reducer and additives

These materials - waste of the machine-building enterprises and metallurgical complex, its utilization is difficult. Process allows to provide return of these materials to production. The main purpose of using the thermite material, that fills the cavity of the extended core is to regulate the temperature and supply metal to the building-up zone of the resulting material on the surface of the part - the basis. Slag, formed as a result of the aluminothermic component of the thermal effect on the fusion tub, slows the rate of heat removal from the last. Temperature influence in a zone of contact of the build-up metal with basis is regulated by the current, tension and time of their stay in a zone of thermal influence. After crystallization the chemical analysis of build-up material zone is carried out, the structure, strength and dimensional and geometrical parameters of received product are defined.

During the experiment is established. compliance of chemical composition of build-up metal of a zone of thermal influence to the material of basis executed from St3 defined in accordance with GOST 380-2005. Comparison of traditional structures with the structures received in the experimental way has established a number of insignificant distinctions. The parameters of the thermal effect on the joint area of the build-up metal with the basis are determined, at which it corresponds to the required strength and dimensional-geometric characteristics.

Keywords: processing of mechanical engineering waste, electric arc impact, thermite mix, chemical composition, thermal influence, zone of thermal effect, structure, dimensional geometric characteristics, alumoterma, surfacing.

Введение

Среди критериев оценки качества стальных конструкций, элементы которых эксплуатируются в условиях значительных механических нагрузок или в агрессивных средах, важным представляется не только высокий уровень их прочности, достигаемый при использовании новых технологий, но и возможность продления работоспособности путем восстановления их элементов. Значительным конкурентным преимуществом таких технологий должна быть их направленность на сбережение энергетических ресурсов и материалов, использование вторичного сырья. В настоящее время решение задачи, связанной с продлением ресурса деталей, осуществляется при помощи технологий наплавки металла на изношенное изделие или его участок [1, 2]. Однако такие технологии хотя и продлевают срок эксплуатации изделия, но не в полной мере отвечают требованиям рационального использования материалов и энергии. Применение металлотермии для получения жидкого металла из отходов машиностроительных предприятий соответствует основным принципам ресурсосбережения в производстве металлоизделий [3]. Одной из таких технологий является наплавление металла на изношенные участки металлоконструкций, в том числе протяженных, при помощи жидкой металлической фазы, получаемой в результате алюмотермической реакции [4]. Реализация технологических процессов на основе такой реакции в настоящее время осуществляется как для обогрева прибыльной части отливок, так и для получения всего тела отливки [5]. В других процессах – для получения неразъемных соединений, например стыка рельсов.

Новым представляется применение такого процесса в наплавлении металла на неразделанную

кромку стального изделия при помощи стального стержня-электрода (СЭ), представляющего собой протяженную оболочку, заполненную термитным наполнителем по принципу порошковой проволоки [6]. В основе разрабатываемого технологического процесса лежит экзотермическая окислительно-восстановительная реакция, в ходе которой происходит восстановление железа из окалины с получением термитной стали [4]. Исходной шихтой для получения термитной стали служит смесь, представляющая собой композицию порошка алюминия, окалины и наполнителей. Эти материалы являются отходами предприятий машиностроительного и металлургического комплекса, утилизация которых затруднительна. Процесс направлен на обеспечение возврата таких отходов в производство. Локальный нагрев, необходимый для наплавки металла на изношенную стальную деталь в рассматриваемом процессе, можно обеспечить при помощи подвода к ее поверхности тепла, возникающего в результате одновременного электродугового и алюмотермитного воздействия от протяженного СЭ, состоящего из стальной оболочки, в которой заключен термитный наполнитель [7, 8]. Основными целями использования термитного материала, заполняющего полость протяженного СЭ, являются регулирование температуры и поставка металла в зону наплавки получаемого материала на стальную поверхность-основу. Шлак, образующийся в результате алюмотермической составляющей теплового воздействия на ванну расплава, замедляет скорость отведения тепла от последней [9, 10].

В качестве дополнительных компонентов термитной шихты могут быть использованы стружка черных металлов, ферросплавы, лигатуры и модификаторы для доведения стали по химиче-

скому составу и свойствам. Экспериментально установлено, что в процессе автоматической наплавки под слоем флюса благодаря использованию порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем возможно получить экономию материалов и электроэнергии при обеспечении требуемого качества металла в зоне термического влияния. Однако информация о тепловых режимах воздействия на получаемый наплавлением металл, его химическом составе, структуре и прочностных характеристиках представляется недостаточной. Таким образом, изучение методов управления свойствами наплаваемого металла представляется востребованным и определяет актуальность проводимых исследований.

Серией предварительных теоретических исследований определено влияние зоны локального нагрева участка соединения наплавленного металла и неподготовленной поверхности детали в виде пластины, являющейся основой, на картину ее деформации. В ходе исследований решалась одномерная задача теории температурных напряжений о локальном прямолинейном нагреве пластины со свободными краями, изготовленной из упругопластического материала [11]. Для решения принимали конечным поперечный размер пластины и бесконечным – продольный. Использовали квадратичную зависимость предела текучести однородного материала от температуры и линейную зависимость упругих модулей. В ходе изучения эволюции температурных напряжений при быстром возрастании температуры на продольной прямой в результате нагрева и охлаждения материала до температуры окружающей среды проведена оценка уровня распределения по пластине остаточных напряжений. В результате высокого градиента температуры, возникающего в зоне термического влияния, появляется пластическое течение, приводящее к росту необратимых деформаций, значения которых зависят от температуры. После остывания зоны термического влияния возможно повторное пластическое течение в области, где ранее развились необратимые деформации, медленно протекающее с обратным знаком. В результате медленного охлаждения необратимые деформации не могут исчезнуть полностью и приводят к возникновению нейтрального нагружения. В результате теоретических исследований определено, что наибольшие перемещения расположены в области упругопластической границы, на которой происходит падение напряжения. На основе этих расчетов можно прогнозировать деформацию всей детали, претерпевшей разогрев поверхности, полученный при равномерном последовательном автоматическом режиме

наплавания металла под слоем флюса на протяженную поверхность стальной пластины. Однако с определенной степенью достоверности просчитать прочностные характеристики наплавленного металла и деформацию восстановленной детали, прогнозируемую в результате совместного электродугового и алюмотермического воздействия, представляется затруднительным.

Указанные выше соображения легли в основу разрабатываемого технологического процесса, направленного на продление срока службы стальных изделий получением на них прочного наплавленного слоя. Посредством совмещения энергии электродугового и алюмотермитного воздействий обеспечивается локальный разогрев наплаваемого материала и поверхности восстанавливаемой стальной детали. При этом интерес представляет осуществление наплавки в наиболее неблагоприятных условиях: без подготовки поверхности детали, без подготовки материалов наплавки и т.д.

Осуществление наплавания металла на неподготовленную поверхность представляется эффективным в условиях автоматического процесса под слоем флюса. В настоящее время не определен потенциал дополнительного, вносимого экзотермической реакцией тепла при применении такого процесса в плане сокращения трудоемкости и стоимости получения восстановленного контура детали после наплавки. Изучение влияния режимов такого процесса на релаксацию напряжений в наплавленном металле, определяющих геометрию восстановленного изделия, разработка оптимальных режимов теплового воздействия на зону контакта металла наплавки и основы также является важным в расширении использования данного технологического процесса и определяет актуальность проводимых в этом направлении исследований.

Цели и задачи

Целью настоящей работы является определение наиболее эффективного теплового режима воздействия на зону контакта наплаваемого металла со стальным протяженным элементом конструкции, получаемого при совместном электродуговом и алюмотермическом воздействии на формирование требуемых геометрических параметров изделия после наплавки, структуры и физико-механических свойств наплавленного металла и зоны термического влияния.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

– получение «за 1 проход» СЭ металлической наплавки на стальную пластину при различных параметрах теплового воздействия в автоматическом режиме под флюсом;

- регистрация изменения геометрии стальных пластин после наплавки металла на их поверхность;
- определение физико-механических свойств наплавленного металла;
- исследование структуры зон наплавления и термического влияния, зонального и химического составов;
- на основании комплекса полученных результатов исследований определение наиболее технологически приемлемого теплового режима наплавления металла на протяженную стальную пластину.

Методы решения задач и материалы

Рассматриваемый процесс осуществляется при помощи агрегата АДФ-1000-5Е для автоматической подачи протяженного СЭ в зону нагрева под слоем флюса. Экспериментальный СЭ выполнен в виде порошковой проволоки Ø2,8 мм с термитным наполнителем (коэффициент заполнения $K_3 \approx 0,4$) – далее СЭ₁. Для автоматического процесса подобран флюс АН-348. В порошковой проволоке термитная смесь используется в качестве дополнительного регулятора температуры и поставщика металла в зону наплавления на поверхность стальной пластины.

Термитный наполнитель СЭ₁ получали смешиванием компонентов фракций 0,16–0,315 мм [12, 13] после отсева на ситах модели 026 (ГОСТ 29234.3–91): железной окалины (Fe_mO_n), алюминиевых сплавов, ферромарганца ФМн78(А) (ГОСТ 4755–91), ферросилиция ФС50 (ГОСТ 1415–93), порошка графитированных электродов ЭГ15 (ТУ 14-139-177–2003). Соотношение компонентов в смеси определяется необходимостью обеспечения соответствия содержания элементов в ванне расплава низкоуглеродистым и низколегированным маркам сталей [6].

Отработка технологического процесса осуществлялась наплавлением металла на пластины из СтЗсп без подготовки поверхности со следующими размерами: толщина $\delta = 10$ мм, ширина 150 мм и длина 500 мм (рис. 1). Изделие получали при однократном тепловом воздействии на зону контакта материала наплавки с основой. Температурное воздействие в зоне контакта регулировали силой тока, напряжением и временем их пребывания в зоне термического влияния, т.е. скорости перемещения СЭ V , м/ч. Принципиально важным является наплавление металла на край неподготовленной поверхности пластин с целью дальнейшего получения образцов для определения прочностных характеристик металла наплавки.

По завершении процесса и после охлаждения металла наплавки регистрировали изменение размеров и геометрии стальной пластины для определения деформационных отклонений от базовой поверхности. Деформацию пластины после охлаждения характеризовала величина отклонения размеров сформированного наплавленного слоя от начального (определялась стрелочным индикатором КИ путем установки детали на горизонтальной базовой плоскости). Измерение проводили по длине и ширине элемента 5 пластины с наплавкой, представленного на рис. 1, с шагом измерения, равным 0,01 м. Результаты отклонений определяли по осям согласно схеме, представленной на рис. 1: x – длина, мм; y – ширина, мм; z – Δ , мм. По полученным данным строили поверхности деформационных отклонений Δ_i , мм, для каждого режима получения наплавки, а также соответствующие каждой поверхности деформационных отклонений заготовок Δ_i . Δ_i получали в результате построения поверхности по экспериментальным данным в программе Microsoft Excel. На рис. 2 представлена поверхность деформационных отклонений пластины после наплавки металла за 1 проход при режиме 4.

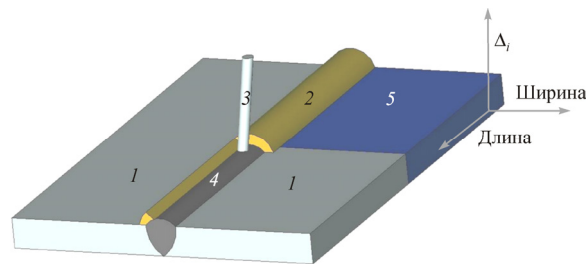


Рис. 1. Схема автоматического процесса электродуговой наплавки материала СЭ на стальные пластины: 1 – пластина (без разделки кромок); 2 – флюс; 3 – СЭ; 4 – металл наплавки; 5 – зона определения отклонений

В ходе определения физико-механических свойств наплавленного металла исследовались: прочность на разрыв, ударная вязкость, твердость зоны термического влияния. Затем проводилось исследование структуры, фазового и химического составов образцов с удовлетворительными прочностными характеристиками.

Образцы для определения физико-механических свойств изготавливали с учетом требований ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение», ГОСТ 9454–78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах» и ГОСТ 9013–59 «Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу».

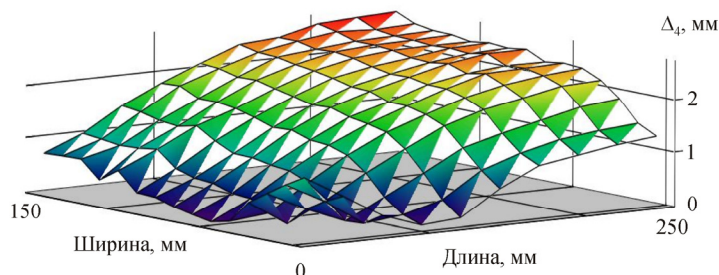


Рис. 2. Внешний вид поверхности деформационных отклонений Δ_4 , мм, от базовой поверхности элемента стальной пластины с наплавленным на кромку металлом

Напряжение, предел текучести и относительное удлинение при растяжении образцов определяли на универсальной испытательной машине AG-X plus SHIMADZU при постоянной скорости перемещения захватов 0,05 мм/с. Величину ударной вязкости определяли маятниковым копром типа МК, выполненным по ГОСТ 10708–82. Твердость определяли стационарным твердомером ТК-2М с индентором в виде алмазного конуса.

Детальное объемное изображение макроструктур в месте разрыва получали в виде фрактотграмм на растровом электронном микроскопе S-3400N HITACHI при увеличении $\times 100$. При определении микроструктуры наплавленного металла (с увеличением $\times 400$) использован микроскоп оптический AXIO VERT A1 с цифровой камерой AxioCam ERc5s.

Химический анализ определяли согласно ГОСТ 18895–97 «Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа» при помощи приставки для элементного анализа OXFORD Instruments X-max80 к растровому электронному микроскопу ZEISS EVO MA10, а также экспресс-анализатора на углерод АН 7529.

Основное содержание работы

Процесс наплавления в производственных условиях осуществляют при различных режимах теплового воздействия, которые отличаются скоростью перемещения СЭ и электрическими параметрами. Важными электрическими параметрами возникающей дуги, определяющими тепловую мощность процесса, являются падение напряжения на дуге U , В, и сила тока I , А [14]. При определении полной тепловой мощности дуги Q , кал/с, ее приближенно считают равной тепловому эквиваленту электрической мощности согласно выражению

$$Q = 0,24UI,$$

где 0,24 – коэффициент перевода электрических величин в тепловые, кал/Вт·с.

Это выражение не учитывает технологические условия расплавления металла, наносимого на стальную основу. Для сравнения энергозатрат при различных режимах теплового воздействия целесообразно оперировать эффективной тепловой мощностью дуги q , которая представляет собой количество теплоты, введенное за единицу времени в металл изделия и затраченное на его нагрев:

$$q = Q\eta,$$

где η – эффективный коэффициент полезного действия (КПД) нагрева, который для процессов образования жидкой ванны металла под слоем флюса составляет 0,90–0,99 [14]. Величина η зависит от ряда параметров, среди которых длина дуги, глубина проникновения дуги в ванну. На эти параметры, в свою очередь, влияют свойства материала и удельная плотность СЭ, определяемая коэффициентом ее заполнения [15]. В процессе получения расплава часть энергии, выделяемая дугой, остается у расплавленного торца СЭ и при передаче теплоты от дуги к электродной капле поглощается жидким металлом капли. Тепловая энергия передается металлу основы, вызывая нагрев и расплавление электродного стержня [16].

Таким образом, чем больше металла приходит в ванну с электродом, тем выше значение η . Очевидно, что значение $\eta = 0,99$ достигается только при использовании проволоки сплошного сечения. Коэффициент заполнения K_3 сердечника порошковой проволоки, как правило, ограничен диапазоном $0,15 < K_3 \leq 0,4$ [17] и лишь в незначительном числе случаев превышает 0,4. При использовании СЭ с высоким K_3 эффективный КПД нагрева $\eta = 0,9$. Это означает, что эффективная тепловая мощность дуги при использовании СЭ₁ будет ниже, чем при использовании СЭ в виде проволоки сплошного сечения (далее СЭ₂). Ввиду этого обстоятельства при проведении эксперимента для получения сварных соединений применялись режимы автоматического процесса, отличные от традиционного по основным параметрам (табл. 1). В табл. 1 i – порядковый номер режима.

Таблица 1
Режимы формирования наплавки металла от СЭ на кромки стальной пластины

Режим	I_i , А	U_i , В	V_i , м/ч	Q_i , кал/с	q_i , кал/с
1*	200	35	20	1,68	1,51
2*	300	35	10	2,52	2,27
3*	250	40	20	2,4	2,16
4*	250	35	20	2,1	1,89
5**	250	35	20	2,1	2,08

Примечание: * при расчете q для случаев применения режимов 1–4 наплавки материала СЭ₁ (при условии $K_3 = 0,4$) использовали значение $\eta = 0,9$;

** режим 5 (традиционный процесс автоматической наплавки под флюсом низкоуглеродистой стали СтЗсп) произведен на АДФ с СЭ₂ марки Св-08ГС и является образцом-свидетелем для режима 4 с аналогичными параметрами процесса, для которого при расчете q использован $\eta = 0,99$.

Указанные в табл. 1 режимы являются классическими, например, для процессов сварки АДФ с электродной проволокой диаметром 2,8 мм. Из табл. 1 видно, что при одинаковых режимах получения наплавки и равенстве значений тепловой мощности дуги ее эффективная тепловая мощность, полученная при АДФ СЭ₂, выше, чем при использовании СЭ₁.

Максимальные значения амплитуды деформационных отклонений от базовой поверхности элементов заготовок с наплавленным металлом при различных режимах представлены на рис. 3.

Функции деформационных отклонений заготовок Δ_i , мм, для рассматриваемых режимов, полученные при использовании программного продукта Microsoft Excel, имеют вид

$$\Delta_1 = -0,2462 - 0,0066x + 0,0205y - 1,9197 \cdot 10^{-5}x^2 + 2,4146 \cdot 10^{-5}xy - 4,5057 \cdot 10^{-5}y^2;$$

$$\Delta_2 = -0,8032 - 0,0215x + 0,0443y + 5,0039 \cdot 10^{-5}x^2 + 4,3487 \cdot 10^{-5}xy - 8,6465 \cdot 10^{-5}y^2;$$

$$\Delta_3 = -0,7577 + 0,0003x + 0,0156y + 1,0898 \cdot 10^{-5}x^2 + 1,6450 \cdot 10^{-5}xy + 5,7713 \cdot 10^{-5}y^2;$$

$$\Delta_4 = -0,1912 - 0,0068x + 0,0254y - 1,8765 \cdot 10^{-5}x^2 + 2,3516 \cdot 10^{-5}xy - 4,3059 \cdot 10^{-5}y^2;$$

$$\Delta_5 = 0,1126 - 0,0791x + 0,0202y + 0,0002 \cdot 10^{-5}x^2 + 3,3048 \cdot 10^{-5}xy - 4,5235 \cdot 10^{-5}y^2,$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ – поверхности отклонений, соответствующие режимам 1, 2, 3 и 4, а Δ_5 – поверхность отклонений традиционного способа.

Из рис. 3 видно, что наименьшей амплитудой отклонений значений деформации по оси z относительно базовой поверхности обладают образцы, полученные при использовании режимов наплавки 1 и 4 (см. табл. 1). Таким образом, при режиме 4 значение амплитуды максимальных отклонений в 1,47 раза меньше, чем при традиционном способе, осуществляемом при помощи режима 5.

Основной задачей при восстановлении рабочей поверхности стальной детали является достижение прочностных характеристик наплавки, не уступающих значениям прочности основного металла. Автоматический процесс наплавки под флюсом целесообразно использовать для восстановления протяженных изношенных стальных деталей.

В данной работе в качестве материала основы пластины выбрана сталь марки СтЗсп. Согласно ГОСТ 535–2005 для СтЗсп временное сопротивление разрыву для проката толщиной 10 мм составляет $\sigma_b = 370...480$ Н/мм²; предел текучести $\sigma_T = 245$ Н/мм²; относительное удлинение $\delta = 26$ %; ударная вязкость для СтЗсп не нормируется, но составляет $KCU = 49$ кДж/м². Оценку прочности металла наплавки целесообразно проводить сопоставлением со значениями прочности длинномерных неразъемных соединений, получаемых сваркой, которые регламентируются требованиями ряда стандартов. Например, согласно табл. Д1 ГОСТ Р 52857.1–2007. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования», для стыка деталей из углеродистых и легированных

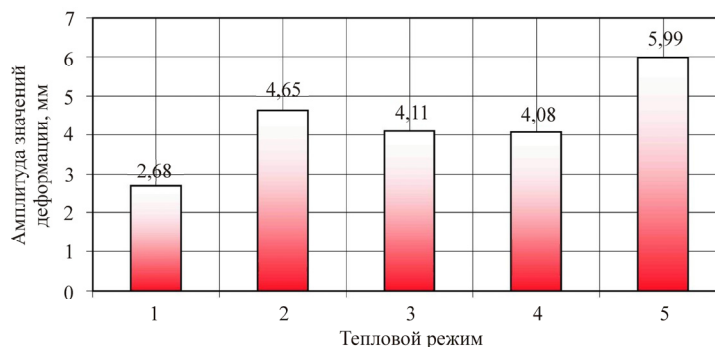


Рис. 3. Максимальные значения амплитуды деформационных отклонений, мм, от базовой поверхности элементов заготовок с наплавленным слоем металла, полученном при различных тепловых режимах

сталей, выполняемого автоматической и полуавтоматической сваркой с одной стороны, с флюсовой или керамической подкладкой, применяется понижающий коэффициент прочности сварного шва, который составляет 0,8. Таким образом, удовлетворительными следует признать показатели прочности наплавленного металла, укладываемые в интервалы значений по временному сопротивлению разрыву $\sigma_b = 296...384 \text{ Н/мм}^2$ и пределу текучести $\sigma_T = 196 \text{ Н/мм}^2$. Физико-механические свойства наплавленного металла, полученного при однократном тепловом воздействии СЭ на зону наплавки, представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Из анализа данных, представленных в табл. 2 и на рис. 4, можно сделать следующие выводы. Средняя прочность на разрыв серии образцов, полученных при I_1 , на 20 % меньшей, чем у традиционного режима (режим 1, при котором $I_5 = 250 \text{ А}$), при условии $U_1 = U_5 = 35 \text{ В}$, не превышает 100 МПа, а значит, получение достаточной эксплуатационной прочности наплавленного металла не представляется возможным. Средняя прочность на разрыв серии образцов, полученных при I_2 , на 20 % большей, чем I_5 , при условии $U_2 = U_5 = 35 \text{ В}$ и $V_2 = 10 \text{ м/ч}$, составила 390 МПа, что сопоставимо с прочностью СтЗсп. Значение ударной вязкости материала наплавки $KCU_2 > 88 \text{ кДж/м}^2$. Однако значения $HRC_{ш2} = 47$ и

$HRC_{т.в2} = 46$ ниже, чем $HRC_{ш5} = 55$ и $HRC_{т.в5} = 49$. Предел текучести не превышает 103 МПа, что является недостаточным для сохранения эксплуатационной прочности материала, особенно при его работе в условиях знакопеременных нагрузок. Режим 3, отличающийся от традиционного более высоким напряжением $U_3 = 40 \text{ В}$ (что на 14 % больше, чем U_5), не позволяет получить прочность наплавленного металла на разрыв большую, чем 166 МПа. Таким образом, достижение удовлетворительных прочностных показателей наплавленного металла, получаемых за 1 проход СЭ₁ при автоматическом процессе под флюсом при вольт-амперных характеристиках, соответствующих режимам 1–3, не представляется возможным. Таким образом, применение термитного наполнителя в СЭ₁ при режимах 1–3 получения металлической наплавки не представляется эффективным.

В результате эксперимента определено, что прочностные характеристики металла наплавки, полученного с применением СЭ₁ в режиме, соответствующем традиционному, отличаются от последнего большими показателями прочности на разрыв ($\sigma_b \approx 307 \text{ МПа}$), ударной вязкости (52 кДж/м^2) и предела текучести $\sigma_T = 197 \text{ МПа}$. Эти показатели соответствуют нижнему пределу прочностных требований к СтЗсп согласно ГОСТ 535–2005 с учетом применяемого в нашем случае при оценке прочности

Таблица 2

Ударная вязкость и твердость образцов, полученных при различных режимах теплового воздействия

Номер режима		1	2	3	4	5
*KCU _i , кДж/м ²		36,4	>88	44,4	52	34
HRC	HRC _ш	50	47	57	55	55
	HRC _{т.в}	45	46	45	49	49

Примечание: *KCU_i – ударная вязкость *i*-го режима, кДж/м²; HRC – твердость по Роквеллу; HRC_ш и HRC_{т.в} – твердость наплавленного металла и зоны термического влияния (материала основы) на расстоянии 10 мм от центра наплавленного металла.

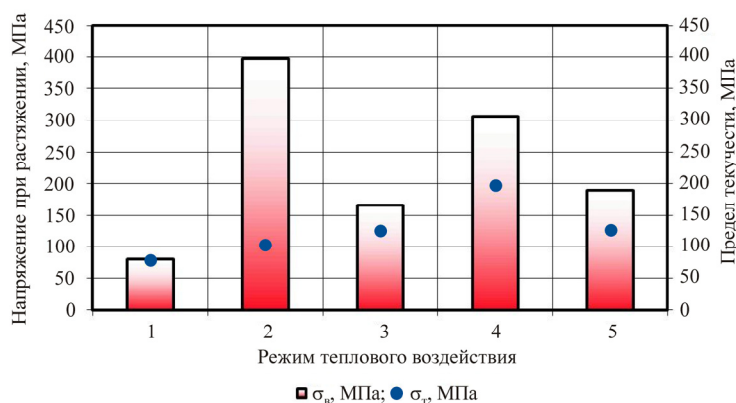


Рис. 4. Диаграммы значений предела текучести и напряжения, возникающего при растяжении образцов металла наплавки, полученных за 1 проход СЭ при различных режимах теплового воздействия

материала шва сварных соединений понижающего коэффициента, регламентируемого ГОСТ Р 52857.1–2007. Значение поверхностной твердости сопоставимо со значениями образцов, полученных СЭ₂ в режиме 5. В целом применение режима 4 для получения металла наплавки за 1 проход СЭ₁ представляется наиболее удовлетворительным по физико-механическим характеристикам, которые превышают таковые, полученные при испытании образца свидетеля 5.

Площадь и внешний вид металла наплавки, полученного за 1 проход СЭ₁ и СЭ₂ по режимам 4 и 5 соответственно, а также места разрыва наплавленного металла представлены на рис. 5. На рис. 5 видны деформации стальной пластины после наплавки, а также различия макроструктур поверхностей в зоне разрыва.

Теплота, выделяемая источником нагрева при наплавлении, в результате теплопроводности распространяется на прилегающие наплавленному металлу участки основы. Участки основы, расположенные рядом с источником тепла, нагреваются до наиболее высоких значений температуры. По мере удаления от источника нагрева температура металла снижается. В зоне контакта металла наплавки с металлом основы происходят наиболее резкие изменения его структуры и свойств. Меньшей ширине участка основного металла, прилегающего к на-

плавленному металлу, соответствуют тепловые условия, характеризуемые большим перепадом значений температуры [14, 18]. В этой связи структура металла, безусловно, является одним из факторов, определяющим картину его разрушения и прочностные характеристики. Оценить характер разрушения образцов в зоне наплавления возможно при помощи фрактограмм, представленных на рис. 6.

Для образца, показанного на рис. 6, а, характерен вязкий излом. Вязкому разрушению соответствует большая энергия (большая работа, затрачиваемая на распространение трещин). Ввиду этого при вязком разрушении скорость распространения трещин мала, а при хрупком разрушении скорость распространения трещин близка к скорости звука [19, 20]. Для образца, представленного на рис. 6, б, характерен хрупкий излом. Энергия хрупкого разрушения мала (работа, затрачиваемая на распространение трещин, близка к нулю). Следовательно, режим 4 более благоприятен для формирования наплавленного металла, чем при условиях режима 5. Таким образом, применение порошковой проволоки на основе термитной шихты позволяет обеспечить получение структуры металла наплавки с более высокой вязкостью, чем при использовании классического режима, что, вполне очевидно, сказывается на прочностных характеристиках наплавки.

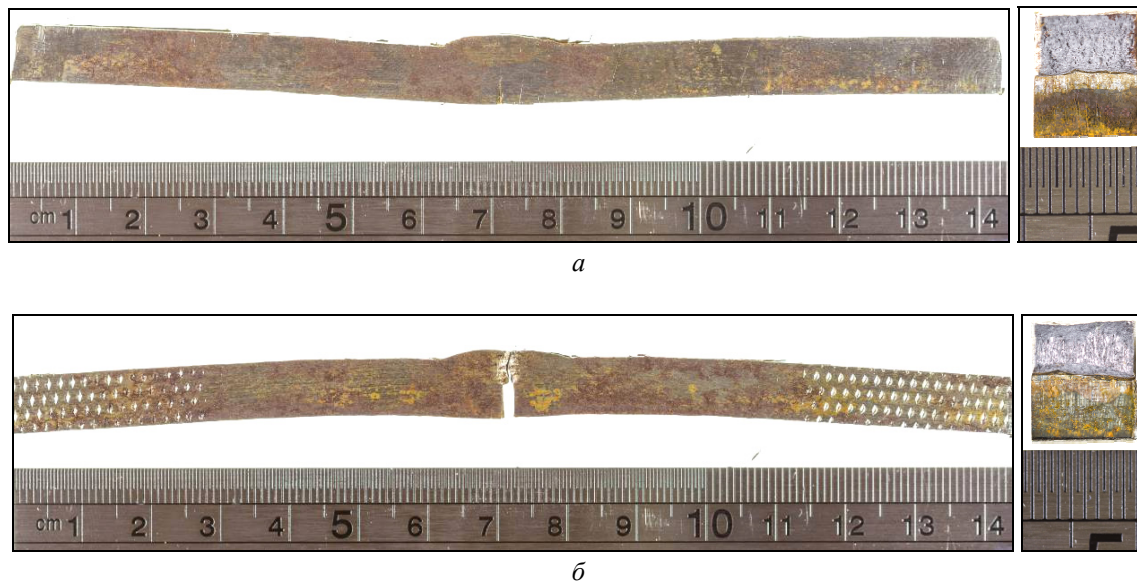


Рис. 5. Внешний вид торца стальной пластины (слева) и разрыва в зоне наплавки (справа), полученного при различных режимах: а – режим 4; б – режим 5

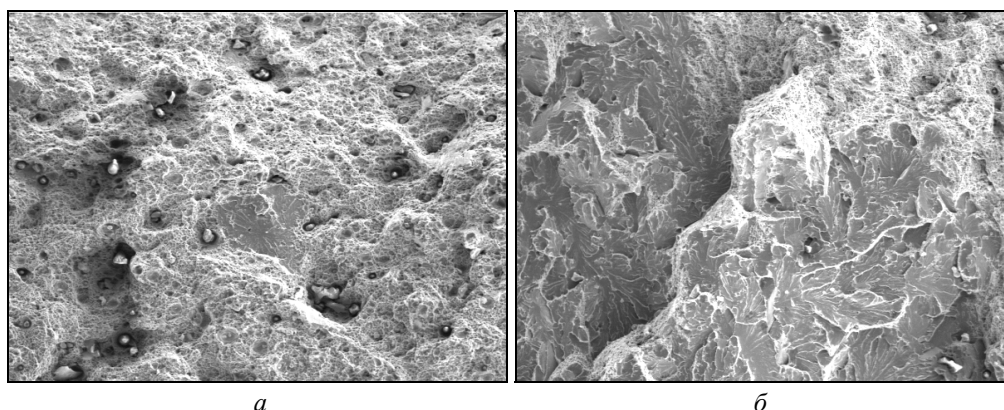


Рис. 6. Фрактограммы образцов в месте разрыва ($\times 100$), полученных при АДФ-процессе: *а* – с применением СЭ₁ при режиме 4; *б* – с применением СЭ₂ при режиме 5

Поскольку при малом увеличении в результате визуального сравнения структур, полученных традиционным способом, с экспериментом выявлен ряд отличий, целесообразным представляется сравнение структур различных зон. При получении металла наплавки СЭ₂ зона сплавления наплавки с основой находится в твердо-жидком состоянии. Этот участок имеет ширину 0,1–0,4 мм и отличается от участков основного металла, что вызвано диффузией элементов, протекающей в зоне сплавления [14]. В участок перегрева (участок крупного зерна) шириной 1–3 мм входит металл, который, как правило, нагревается от температуры 1200 °С до температуры плавления основного металла. Зона перекристаллизации шириной 0,1–3,0 мм состоит из мелких и крупных зерен с пониженными механическими свойствами, включает металл, нагретый до температуры 720–880 °С. Металл участка неполной перекристаллизации характеризуется ферритным зерном, дроблением и сфероидизацией перлитных участков. Феррито-перлитная структура СтЗсп по завершении термических циклов после перекристаллизации почти не меняется.

Экспериментом установлено, что зона термического влияния при использовании СЭ₁ больше на 10–12 %, чем при использовании традиционной структуры. Сравнение структур зон теплового воздействия, полученных СЭ₂ и экспериментальным СЭ₁, позволяет выяснить причины получения различий прочностных характеристик наплавляемого металла.

На рис. 7 представлены микроструктуры металла, полученного при АДФ-процессе в зоне сплавления, на участке перегрева, в зоне перекристаллизации и рекристаллизации ($\times 400$): *а* – образец, полученный при режиме 4 порошковой проволокой с термитным наполнителем; *б* – образец, по-

лученный проволокой сплошного сечения при режиме 5.

Из анализа рис. 7 видно, что для зоны сплавления и участка перегрева характерна феррито-перлитная структура, представляющая собой укрупненные зерна. Размеры зерен образцов, полученных при АДФ с СЭ₁, в указанных на рис. 6 зонах отличны от размеров зерен зоны термического влияния, полученной при АДФ СЭ₂. Структура участков перекристаллизации и рекристаллизации также является ферритно-перлитной, но с меньшим размером зерен. Таким образом, структуры образцов, полученных при АДФ СЭ₁, сопоставимы со структурой традиционных образцов, получившихся при АДФ СЭ₂.

На рис. 8 представлено сравнение размеров зерен в зоне локального нагрева (наплавления), перегрева, перекристаллизации и в зоне основного металла образцов, полученных экспериментальным способом и при тепловом режиме 5 с СЭ₂.

Из рис. 8 видно, что зерно металла в зоне наплавления, полученного с СЭ₁, на 20 % меньше, чем при традиционной АДФ с СЭ₂; размеры зерен зон перегрева и основного металла можно считать идентичными, а зерно образца, полученного при режиме 4, в зоне перекристаллизации на 15 % меньше, чем у традиционного образца.

Химический состав металла в зоне локального нагрева представлен в табл. 3

Из табл. 3 видно, что химический состав соответствует значениям диапазона содержания основных элементов для СтЗсп по ГОСТ 380–2005: С = 0,14...0,22 %; Мп = 0,4...0,65 %; Si = 0,15...0,30 %. Содержание легирующих добавок в наплавочном материале СЭ₁ несколько выше, чем в СЭ₂. Это обстоятельство, однако, не оказывает негативного влияния на прочностные характеристики наплавленного металла.

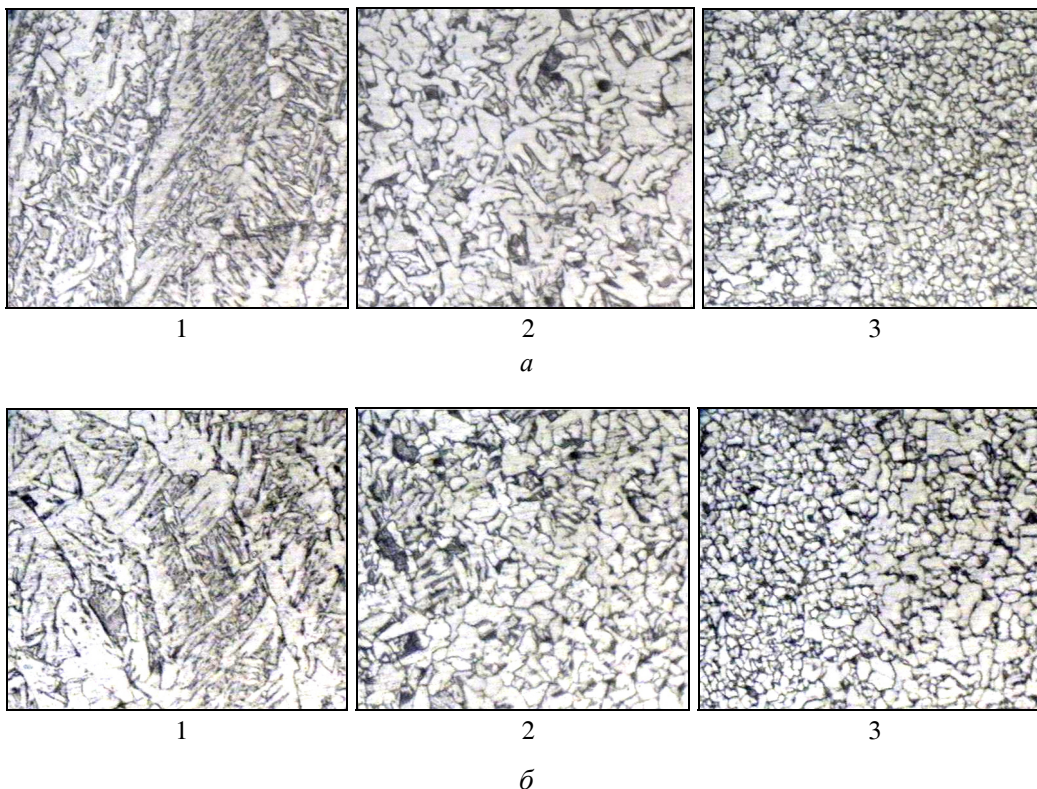


Рис. 7. Микроструктура металла образцов (×400) в зоне шва (1), сплавления и на участке перегрева (2), в зоне перекристаллизации и рекристаллизации (3): *a* – образец, полученный при АДФ СЭ₁; *б* – образец, полученный при АДФ СЭ₂

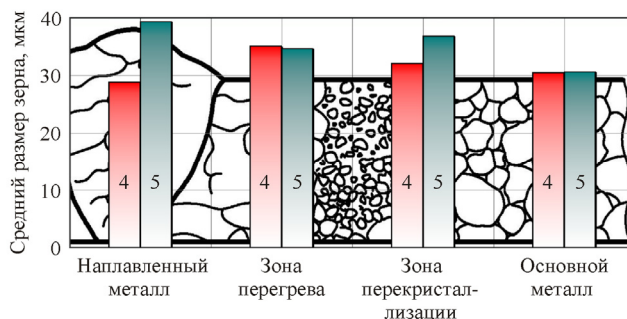


Рис. 8. Средний размер зерен

Таблица 3

Химический состав образцов в зоне локального нагрева

Режим	Содержание, мас. %						
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
4	0,21	0,28	0,6	0,26	0,032	0,029	0,28
5	0,2	0,22	0,52	0,24	0,039	0,033	0,25

Заключение

В ходе проведенных экспериментов установлена возможность получения металлической наплавки за 1 проход на стальных протяженных элементах в виде пластин при различных режимах теплового воздействия автоматическим процессом под флюсом

СЭ₁ в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем. Зона термического влияния стальной пластины формируется при совместном электродуговом и алюмотермическом воздействии.

Применение СЭ₁ обеспечивает получение наплавляемого на стальную пластину металла боль-

шей вязкости, чем при наплавлении металла СЭ₂ классическим методом. Результатами исследований установлены меньшие размеры зерен структуры наплавленного металла, полученного с использованием СЭ₁. Они позволяют добиться лучших физико-механических свойств, меньших деформаций основного металла пластины, на которую произведено наплавление, в сравнении с характеристиками, полученными при наплавлении СЭ₂. Химический состав экспериментальных образцов соответствует ГОСТ 380–2005.

Таким образом, установлено, что для получения прочного материала наплавки на изношенную кромку стальной пластины с меньшими деформациями последней при равных энергозатратах и режимах теплового воздействия, применяемого для наплавления в АДФ-процессе, использование СЭ₁ представляется предпочтительным в сравнении с СЭ₂.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00.

Список литературы

1. Михеев Д.А. Восстановление замковых соединений бурильных труб методом наплавки // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – № 1(49). – С. 143–149.
2. Исследование качества однослойной антикоррозионной наплавки, выполненной в условиях ОАО «Ижорские заводы» / Т.И. Титова, Н.А. Шульган, С.А. Бочаров, Е.Г. Старченко, В.Ю. Мастенко, А.В. Воронов, Д.И. Шибяев // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 3. – С. 89–95.
3. Получение слябовых заготовок из кипящей стали для прокатного производства методом металлотермии / О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, В.В. Предеин, Е.Е. Абашкин, А.В. Попов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 136–140.
4. Новохацкий В.А., Жуков А.А., Макарычев Ю.И. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями. – М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.
5. Особенности получения металлошхты из отходов машиностроительных предприятий / О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, И.Г. Сапченко, А.В. Попов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–5. – С. 914–918.
6. Пат. 2454309 RU МПК В23К 35/368. Порошковая проволока / Сапченко И.Г., Абашкин Е.Е. – Оубл. 2012. – Бюл. № 18.
7. Абашкин Е.Е., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Влияние упаковки компонентов термитного наполнителя порошковой проволоки на процессы электродугового переплава // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2018. – Т. 1, № 1(33). – С. 96–104.
8. Абашкин Е.Е. Влияние гранулометрического состава компонентов смеси на заполняемость сварочной порошковой проволоки // Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций: материалы II Дальневост. шк.-сем. / под ред. А.И. Евстигнеева (отв. ред.) [и др.]. – 2017. – С. 7–8.
9. Теоретические основы сварки / В.В. Фролов, В.Г. Винокуров, В.Н. Волченко [и др.]. – М.: Высшая школа, 1970. – 392 с.
10. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
11. Абашкин Е.Е., Каинг М., Ткачева А.В. Температурные напряжения пластины // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2016. – № 4(30). – С. 24–33.
12. Исследование влияния фракции компонентов алюмотермитной смеси на технологические параметры получения термитных сталей / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, В.В. Предеин, Е.Е. Абашкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 6. – С. 33–37.
13. Свойства сварного шва, полученного из термитной шихты / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Е.Е. Абашкин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. – № 1. – С. 100–105.
14. Сварка в машиностроении: справ.: в 4 т. / под ред. Н.А. Ольшанского. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 504 с.
15. Рыбин В.А., Иванов В.А. Исследование влияния конструктивных особенностей и химического состава наполнителя, порошковых проволок на режимы электродуговой сварки // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 7(32). – С. 55–59.
16. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / И.К. Походня, В.Н. Горпенюк, С.С. Миличенко [и др.]; под ред. И.К. Походни; Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. – Киев: Наукова думка, 1990. – 224 с.
17. Порошковые и композиционные проволоки для сварки и наплавки: учеб. пособие / Г.Н. Соколов, Ю.Н. Дубцов, И.В. Зорин, А.А. Артемьев // Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2015. – 128 с.
18. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов и спец. «Оборудование и технология сварочного производства» / В.И. Волченко, В.М. Ямпольский, В.Н. Винокуров [и др.]; под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
19. Лившиц Л.С., Хакимов А.Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
20. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: учеб. для вузов / А.И. Акулов, В.П. Алехин, С.И. Ермаков [и др.]; под ред. А.И. Акулова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.

References

1. Mikheev D.A. Vosstanovlenie zamkovykh soedinenii buril'nykh trub metodom naplavki [Restoration of cast-iron connections of boring pipes by a naplavka method]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2016, vol. 49, no 1, pp. 143–149.
2. Titova T.I., Shul'gan N.A., Bocharov S.A., Starchenko E.G., Mastenko V.Iu., Voronov A.V., Shibaev D.I. Issledovanie kachestva odnosloinoi antikorrozionnoi naplavki, vypolnennoi v usloviakh OAO «Izhorskie zavody» [Research of quality of the single-layer anticorrosive naplavka executed in the conditions of JSC Izhora Plants]. *Voprosy materialovedeniia*, 2007, no. 3, pp. 89–95.
3. Komarov O.N., Zhilin S.G., Predein V.V., Abashkin E.E., Popov A.V. Poluchenie sliabovykh zagotovok iz kipishchei stali dlia prokatnogo proizvodstva metodom metalotermii [Receiving slyabovy preparations from the boiling steel for rolling production by a metalthermic method]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 136–140.
4. Novokhatskii V.A., Zhukov A.A., Makarychev Iu.I. Malootkhodnaia tekhnologiya proizvodstva stal'nykh otlivok s ekzotermicheskimi pribyl'iami [The low-waste production technology of steel castings with exothermic profits]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 64 p.
5. Komarov O.N., Zhilin S.G., Sapchenko I.G., Popov A.V. Osobennosti polucheniia metalloshikhty iz otkhodov mashinostroitel'nykh predpriatii [Features of receiving metal furnace charge from waste of machine-building enterprises]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 12–5, pp. 914–918.
6. Sapchenko I.G., Abashkin E.E. Poroshkovaya provoloka [Flux cored wire]. Patent. Rossiiskaia Federatsiia no. 2454309 (2012).
7. Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N. Vliianie upakovki komponentov termitnogo napolnitelia poroshkovoi provoloki na protsessy ehlektrodugovogo pereplava [Influence of packing of components of thermite filler of a powder wire on processes of arc remelting]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 1, no. 1(33), pp. 96–104.
8. Abashkin E.E. Vliianie granulometricheskogo sostava komponentov smesi na zapolniaemost' svarochnoi poroshkovoi provoloki [Influence of particle size distribution of components of mix on fillability of a welding powder wire] *Fundamental'naya mekhanika v kachestve osnovy sovershenstvovaniia promyshlennykh tekhnologij, tekhnicheskikh ustrojstv i konstrukcij: materialy II Dal'nevostnoi shkoly-seminara*. Ed. A.I. Evstigneev, 2017, pp. 7–8.
9. Frolov V.V., Vinokurov V.G., Volchenko V.N. Teoreticheskie osnovy svarki [Theoretical bases of welding]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1970, 392 p.
10. Tekhnologiya ehlektricheskoi svarki metallov i splavov plavleniem [Technology of electric welding of metals and alloys melting]. Ed. B.E. Patona. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 768 p.
11. Abashkin E.E., Kaing M., Tkacheva A.V. Temperaturnye napriazheniia plastiny [Temperature tension of a plate]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni I.Ia. Iakovleva. Mekhanika predel'nogo sostoiianiia*, 2016, vol. 30, no. 4, pp. 24–33.
12. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N., Predein V.V., Abashkin E.E. Issledovanie vliianiia fraktsii komponentov aliumotermitnoi smesi na tekhnologicheskie parametry polucheniia termitnykh stali [Research of influence of fraction of components of aliumotermitny mix on technological parameters of receiving thermite staly]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2011, no. 6, pp. 33–37.
13. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N., Abashkin E.E. Svoistva svarnogo shva, poluchennogo iz termitnoi shikhty [Properties of the welded seam received from thermite furnace charge]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 1, pp. 100–105.
14. Svarka v mashinostroenii [Welding in mechanical engineering]. Ed. N.A. Ol'shanskogo, Moscow: Mashinostroenie, 1978, vol. 1, 1978, 504 p.
15. Rybin V.A., Ivanov V.A. Issledovanie vliianiia konstruktivnykh osobennostei i khimicheskogo sostava napolnitelia, poroshkovykh provolok na rezhimy elektrodugovoi svarki [Research of influence of design features and the chemical composition of filler, powder a provolok on the modes of arc welding]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz*, 2013, vol. 32, no. 7, pp. 55–59.
16. Metallurgiya dugovoi svarki: Protssy v duge i plavlenie elektrodov [Metallurgy of arc welding: Processes in an arch and melting of electrodes]. I.K. Pokhodnia, V.N. Gorpeniuk, S.S. Milichenko. Ed. I.K. Pokhodni; Institut elektrosvarki imeni E.O. Patona. Kiev: Naukova dumka, 1990, 224 p.
17. Sokolov G.N., Dubtsov Iu.N., Zorin I.V., Artem'ev A.A. Poroshkovye i kompozitsionnye provoloki dlia svarki i naplavki: uchebnoe posobie [Powder and composite a wire for welding and a naplavka]. Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Volgograd, 2015, 128 p.
18. Teoriia svarochnykh protsessov: uchebnik dlia vuzov i spetsial'nosti «Oborudovanie i tekhnologiya svarochnogo proizvodstva» [Theory of welding processes]. V.I. Volchenko, V.M. Iampol'skii, V.N. Vinokurov et al. Ed. V.V. Frolova. Moscow: Vysshiaia shkola, 1988, 559 p.
19. Livshits L.S., Khakimov A.N. Metallovedenie svarki i termicheskai obrabotka svarnykh soedinenii [Metallurgical science of welding and heat treatment of welded connections]. 2 ed. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 336 p.
20. Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavleniem i termicheskoi rezki: uchebnik dlia vuzov [Technology and equipment of welding by melting and thermal cutting]. A.I. Akulov, V.P. Alekhin, S.I. Ermakov et al. Ed. A.I. Akulova. 2 ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 560 p.

Получено 03.05.2018

Об авторах

Абашкин Евгений Евгеньевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – младший научный сотрудник лаборатории химических и фазовых превращений в материалах Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: abashkine@mail.ru.

Жилин Сергей Геннадьевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией химических и фазовых превращений в материалах Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: zhilin@imim.ru.

Комаров Олег Николаевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории химических и фазовых превращений в материалах Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Ткачева Анастасия Валерьевна (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории механики деформирования Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: 4nansi4@mail.ru.

About the authors

Evgenij E. Abashkin (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Junior Researcher, Laboratory Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of the Far-Eastern Branch Russian Academy of Sciences; e-mail: abashkine@mail.ru.

Sergey G. Zhilin (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Chief of Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of the Far-Eastern Branch Russian Academy of Sciences; e-mail: zhilin@imim.ru.

Oleg N. Komarov (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, associate professor, Leading Research Scientist of Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of the Far-Eastern Branch Russian Academy of Sciences; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Anastasiya V. Tkacheva (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph.D. in Physics and Mathematics, Researcher of Laboratory Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of the Far-Eastern Branch Russian Academy of Sciences; e-mail: 4nansi4@mail.ru.