

Е. Е. Абашкин, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, Н. А. Богданова

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НА  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ  
НЕРАЗЪЕМНОЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ  
ЭЛЕКТРОДУГОВОМ И АЛЮМОТЕРМИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

**Аннотация.** Предприятия, ориентированные на получение неразъемных металлоконструкций, характеризующихся долговременной эксплуатационной прочностью, обладают значительными конкурентными преимуществами при условии использования технологий, позволяющих сократить потребление ресурсов. К числу таких технологических решений можно отнести процесс получения сварного шва, образующегося за счет тепла, выделившегося в результате совместного электродугового и алюмотермического воздействий. Локальный нагрев обеспечивается подведением к зоне стыка поверхностей протяженного стержня-электрода (СЭ), выполненного в виде стальной оболочки с термитный порошковым наполнителем, состоящим из смеси оксида железа, восстановителя и легирующих компонентов. Материалы такой смеси являются, преимущественно, отходами предприятий машиностроительного и металлургического комплекса, что позволяет обеспечить их возврат в производство. Основной целью работы является экспериментальное определение параметров теплового режима, при которых достигаются требуемые прочностные характеристики неразъемного соединения. В работе представлены результаты эксперимента, в ходе которого определено влияние энергетического воздействия на напряженно-деформированное состояние и прочностные характеристики получаемых неразъемных соединений.

**Ключевые слова:** отходы машиностроения, электродуговое воздействие, алюмотермическая реакция, тепловой режим, зона термического влияния, напряженно-деформированное состояние, неразъемное соединение, разрыв, прочность

УДК: 621.791.620.17

Важной задачей для предприятий, специализирующихся на производстве металлоконструкций является получение качественной конкурентоспособной продукции за счет технологий, направленных на сокращение энергетических ресурсов и материалов, использование вторичного сырья. Одной из характеристик качества стальных неразъемных соединений и конструкций является способность сопротивляться статическим и динамическим нагрузкам, что определяет их долговременную эксплуатационную прочность. К числу таких технологических решений можно отнести процесс получения сварного шва, образующегося за счет тепла, выделившегося в результате совместного электродугового и алюмотермического воздействий [1]. В основе алюмотермической составляющей процесса лежит экзотермическая окислительно-восстановительная реакция, в результате которой железо восстанавливается из окалина с получением, так называемой, термитной стали [2]. Исходными компонентами для термитной стали являются оксид железа, восстановитель, легирующие добавки или наполнители, смешанные в определенной пропорции. В качестве восстановителя применяют сплавы, содержащие алюминий [3], а наполнителями могут быть стружка черных металлов, ферросплавы, лигатуры и модификаторы, необходимые для доведения стали по химическому составу. Подобные смеси применяют для сварки железнодорожных рельсов. В таком процессе разовая порция расплава, полученного в результате алюмотермической реакции, заполняет полость стыка торцевых частей рельсов и, после затвердевания, формирует их неразъемное соединение. Получение протяженных соединений при помощи термитной смеси, помещенной в сердечник порошковой проволоки представляется новым [4]. Такое соединение достигается в процессе автоматической сварки под слоем флюса, позволяющей получить экономию сварочных материалов и электроэнергии, обеспечить поставку металла в зону термического влияния. Ввиду новизны этого процесса сведения о прочностных и эксплуатационных характеристиках соединения весьма скудны. Таким образом, исследование условий формирования соединений, возможностей управления их свойствами путем регуляции параметров теплового воздействия и определения их предельных величин представляется актуальным. В ходе предварительно проведенных теоретических и экспериментальных исследований определено воздействие зоны термического влияния, образующейся при локальном

---

© Абашкин Е. Е., Жилин С. Г., Комаров О. Н., Богданова Н. А., 2018

*Абашкин Евгений Евгеньевич*

*e-mail:* abashkine@mail.ru, младший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

*Жилин Сергей Геннадьевич*

*e-mail:* zhilin@imim.ru, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

*Комаров Олег Николаевич*

*e-mail:* olegnikolaevitsch@rambler.ru, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

*Богданова Нина Анатольевна*

*e-mail:* joyful289@inbox.ru, младший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

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

Поступила 15.07.2018

нагреве стыка металлических протяженных элементов, на картину деформации полученного неразъемного соединения [5, 6].

В ходе теоретического блока исследований изучена эволюция напряжений при быстром росте температуры на продольной прямой при нагреве и охлаждении материала до значений температуры окружающей среды. В результате проведения оценки уровня распределения по пластине остаточных напряжений отмечено, что высокий градиент температуры в зоне термического влияния приводит к появлению пластического течения, что, в свою очередь, определяет рост значений необратимых деформаций, зависящих от температуры [7]. При остывании зоны термического влияния может наблюдаться медленно протекающее (с обратным знаком) повторное пластическое течение в области необратимых деформации. Пластические деформации полностью не исчезают даже при медленном охлаждении и приводят к появлению нейтрального нагружения. Теоретическими исследованиями установлено, что наибольшие перемещения характерны для области упругопластической границы, где происходит падение напряжения. Проведенные расчеты позволяют прогнозировать деформацию неразъемного соединения, полученного автоматической сваркой под флюсом проволокой сплошного сечения. Однако получение реальной картины деформации и прочностных характеристик соединения, изготовленного при помощи сварки порошковой проволокой с термитным наполнителем, представляется затруднительным.

В результате практической части предварительных исследований установлена возможность получения неразъемного соединения, состоящего из стальных протяженных элементов за один проход сварочного электрода (СЭ), выполненного в виде порошковой проволоки с алюмотермическим наполнителем [8, 9]. При этом размер и структура зоны термического влияния формируются в результате локального нагрева от совместного электродугового и алюмотермического воздействий. Применение такой порошковой проволоки обеспечивает получение большей вязкости металла шва, чем при классическом методе сварки. Лучшие, в сравнении с традиционными, механические свойства металла зоны термического влияния, а также значения деформаций соединения, достигаются за счет уменьшения размеров зерен его структуры. Такие показатели достигаются при равных энергозатратах и режимах теплового воздействия на зону соединения стальных элементов в процессе использования порошковой проволоки с термитным наполнителем. Термитная смесь, использованная в порошковой проволоке, обеспечивает дополнительную регуляцию температуры и поставку электродного металла в зону стыка деталей.

Однако механизм формирования прочности материала зоны термического влияния и методы управляемого воздействия на этот параметр остаются малоизученными. Интерес представляет изучение возможностей управления прочностными характеристиками зоны стыка протяженных стальных деталей посредством совмещения энергий электродугового и алюмотермитного воздействий, в том числе при неблагоприятных условиях: без разделки кромок деталей и без подготовки сварочных материалов.

Таким образом, целью работы является изучение влияния теплового режима на напряженно-деформированное состояние элементов неразъемной металлоконструкции, полученной при электродуговом и алюмотермическом воздействиях.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

— получение «за один проход» неразъемных соединений стальных протяженных элементов в условиях различного времени их пребывания в зоне локального нагрева

и изменяющихся электрических параметрах сварки под флюсом электродом в виде порошковой проволоки с алюмотермическим наполнителем;

— регистрация изменения зоны термического влияния соединения в зависимости от величины тепловой мощности локального нагрева;

— изучение напряженно-деформированного состояния материала шва неразъемного соединения в процессе определения его физико-механических свойств;

— на основании комплекса экспериментальных данных определение теплового режима воздействия на стыковую зону, удовлетворяющего критериям прочности и устойчивости к деформациям получаемого неразъемного соединения.

Автоматическую сварку стальных элементов под слоем флюса (АН-348) осуществляли устройством АДФ-1000-5Е. В качестве электрода использовали порошковую проволоку Ш 2,8 мм с термитным наполнителем, коэффициент заполнения которой составил  $Kз \approx 0,4$ . Алюмотермитный порошок получали смешиванием компонентов фракций 0,16 – 0,315 мм [10]: железной окалины ( $Fe_3O_4$ ), алюминиевых сплавов, ферромарганца ФМн78(А), ферросилиция ФС50, электродного порошка ЭГ15. Соотношение компонентов в смеси регламентировалось содержанием элементов в ванне расплава, соответствующего низкоуглеродистым и низколегированным маркам сталей [11].

Получение неразъемных соединений сваркой в условиях производства осуществляют при различных режимах теплового воздействия, отличающихся скоростью перемещения СЭ и электрическими параметрами. Основными электрическими параметрами дуги, определяющими ее эффективную тепловую мощность  $q$  (кал/с), являются падение напряжения  $U$ (В) и сила тока  $I$ (А) [10]. Для определения эффективной тепловой мощности, учитывающей технологические условия расплавления металла в стыковой зоне целесообразно применять выражение, представляющее собой количество теплоты, введенное за единицу времени в металл изделия и затраченное на его нагрев:

$$q = 0,24UI\eta$$

где 0,24 – коэффициент перевода электрических величин в тепловые, кал/Вт с;  $\eta$  – эффективный коэффициент полезного действия (КПД) нагрева, который для процессов образования жидкой ванны металла под слоем флюса составляет 0,90 – 0,99 [10]. Величина  $\eta$  зависит от длины дуги и глубины ее проникновения в ванну. На эти параметры влияет удельная плотность СЭ, которая определяется коэффициентом ее заполнения [11]. При получении расплава часть энергии дуги концентрируется у расплавленного торца СЭ и в момент передачи теплоты от дуги к электродной капле поглощается жидким металлом. Тепло передается металлу основы, нагревая и расплавляя СЭ [12]. В результате, значение  $\eta$  возрастает пропорционально увеличению объема металла, поступающего в ванну с электродом, что достигается при использовании проволоки только сплошного сечения. Величина коэффициента заполнения сердечника порошковой проволоки ( $Kз$ ) в большинстве случаев находится в диапазоне  $0,15 < Kз < 0,4$  [13]. При этом, использование СЭ с высоким  $Kз$  обеспечивает величину эффективного КПД нагрева  $\eta = 0,9$ . Таким образом, эффективная тепловая мощность дуги при использовании СЭ<sub>1</sub> несколько ниже, чем при использовании проволоки сплошного сечения (СЭ<sub>2</sub>). В связи с отмеченным выше при получении экспериментальных неразъемных соединений применялись автоматические режимы, отличающиеся по основным параметрам от традиционного (табл.1). где 0,24 – коэффициент перевода электрических величин в тепловые, кал/Вт с;  $\eta$  – эффективный

коэффициент полезного действия (КПД) нагрева, который для процессов образования жидкой ванны металла под слоем флюса составляет 0,90 – 0,99 [10]. Величина  $\eta$  зависит от длины дуги и глубины ее проникновения в ванну. На эти параметры влияет удельная плотность СЭ, которая определяется коэффициентом ее заполнения [11]. При получении расплава часть энергии дуги концентрируется у расплавленного торца СЭ и в момент передачи теплоты от дуги к электродной капле поглощается жидким металлом. Тепло передается металлу основы, нагревая и расплавляя СЭ [12]. В результате, значение  $\eta$  возрастает пропорционально увеличению объема металла, поступающего в ванну с электродом, что достигается при использовании проволоки только сплошного сечения. Величина коэффициента заполнения сердечника порошковой проволоки (Кз) в большинстве случаев находится в диапазоне  $0,15 < \text{Кз} < 0,4$  [13]. При этом, использование СЭ с высоким Кз обеспечивает величину эффективного КПД нагрева  $\eta = 0,9$ . Таким образом, эффективная тепловая мощность дуги при использовании СЭ<sub>1</sub> несколько ниже, чем при использовании проволоки сплошного сечения (СЭ<sub>2</sub>). В связи с отмеченным выше при получении экспериментальных неразъемных соединений применялись автоматические режимы, отличающиеся по основным параметрам от традиционного (табл.1).

Таблица 1

#### Характеристики режимов формирования металла

Режим	$I_i, A$	$U_i, B$	$V_i, \text{м/ч}$	$q_i, \text{кал/с}$
0.1*	250	35	20	2,08
1**	200	35	10	1,52
2**	200	35	20	1,52
3**	250	35	10	1,89
4**	250	35	20	1,89
5**	300	35	10	2,27
6**	300	35	20	2,27
7**	250	40	20	2,16
8**	250	30	20	1,62
9**	250	35	30	1,89

где  $i$  – порядковый номер режима.

\* режим № 0.1 (традиционный процесс автоматической наплавки под флюсом низкоуглеродистой стали СтЗсп) на АДФ с СЭ<sub>2</sub> марки Св-08ГС — является образцом-свидетелем для режима № 4 с аналогичными параметрами процесса, для которого при расчете  $q$  использован  $\eta = 0,99$ ;

\*\* при расчете  $q$  для случаев применения режимов №1–9 наплавка материала СЭ<sub>1</sub> (при условии  $\text{Кз} = 0,4$ ) использовали значение  $\eta = 0,9$ .

Неразъемное соединение получали свариванием пластин с необработанными кромками из СтЗ толщиной ( $\delta$ ) 10 мм, шириной 150 мм и длиной 500 мм однократным тепловым воздействием на зону контакта, температуру в которой регулировали силой тока, напряжением и скорости перемещения сварочного электрода,  $V(\text{м/ч})$ . После охлаждения шва определяли его физико-механические свойства: прочность на разрыв, ударную вязкость. Испытания проводили с учетом требований ГОСТ 9454-78 (Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах), ГОСТ 1497-84. (Металлы. Методы испытаний на растяжение). Величину ударной вязкости определяли маятниковым копром типа МК, выполненным по

ГОСТ 10708-82. Напряжение и предел текучести образцов при растяжении определяли при помощи универсальной испытательной машины AG-X plus SHIMADZU при постоянной скорости перемещения захватов 0,05 мм/с. В табл. 2 приведены значения площади образующегося металла наплавки и ударной вязкости этого материала, полученных при различных режимах теплового воздействия в сравнении с образцом, полученным проволокой сплошного сечения.

Таблица 2

**Сравнение площади, образующегося при различных режимах наплавляемого металла, и ударной вязкости полученных из него образцов**

Параметр	Режим									
	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Площадь металла шва, см <sup>2</sup>	0,44	0,45	0,33	0,48	0,23	0,96	0,44	0,27	0,28	0,3
Ударная вязкость КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	34	47,8	36,4	66,7	52	102	50	44,4	42,9	67

Из табл. 2. видно, что значения КСУ всех образцов металла, полученных с применением порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем выше, чем при режиме 0.1. Наибольшими значениями ударной вязкости обладают образцы, полученные при режимах 3 и 9, т.е. при значениях тепловой мощности  $q = 1,89$  кал/с. Сопоставляя данные табл.2, полученные по этим режимам с данными табл.1 можно сделать вывод, что при таких режимах время нахождения зоны стыка соединяемых пластин в расплаве металла существенной роли на показатель КСУ не оказывает. Интересным представляется факт достижения значения КСУ = 52 Дж/см<sup>2</sup> образцом, полученного на режиме 4 при значении площади образующегося металла равном 0,23 см<sup>2</sup>.

На рис.1 представлены зависимости деформаций от напряжений, возникающих на штоке испытательной машины при разрыве образцов, полученных из металла шва при различных тепловых режимах при однократном проходе СЭ. На рис.2 представлена характеристика напряженно-деформированного состояния образца, полученного при тепловом режиме 5, отличающегося наибольшими значениями I и U, а также максимальным временем пребывания зоны стыка в ванне расплава ввиду минимальной скорости перемещения СЭ. По указанной выше причине эта графическая зависимость, характеризующаяся на порядок большими значениями деформаций, размещена на отдельной иллюстрации.

Из рис.1 видно, что прочность металла швов, полученных при показателях тепловой мощности, лежащих в интервале значений  $1,52 \leq q \leq 1,62$  кал/с, не превышает 170 МПа, при значениях деформации не более 0,04 %. Кривые нагружения характеризуются упруго-пластическими зонами, что, в целом приводит к хрупкому разрушению. Очевидно, что такой тепловой мощности недостаточно для создания удовлетворительной прочности наплавленного материала шва, полученного «за один проход». При таких значениях внесенной тепловой мощности скорость сварки заметного влияния на прочностных характеристики образующегося металла не оказывает. Повышение тепловой мощности, в целом, приводит к увеличению прочностных характеристик металла шва. Так, при значениях  $1,89 \leq q \leq 2,27$  кал/с прочность образцов при разрыве лежит в интервале значений  $180 \leq \sigma_b \leq 400$  МПа. Кривые, построенные по результатам

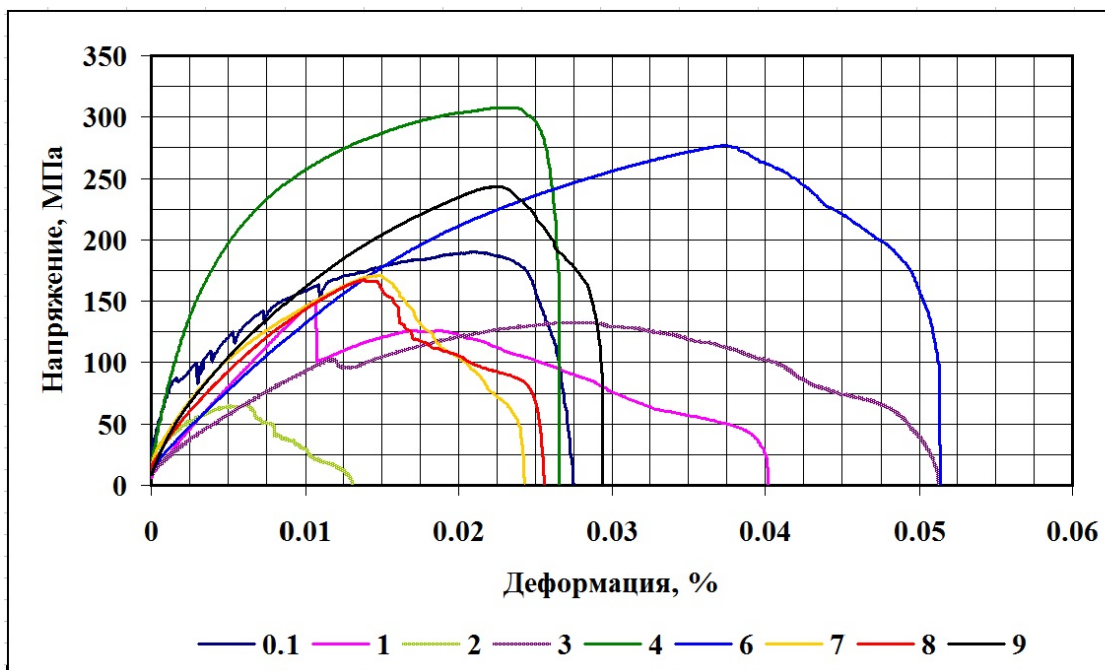


Рис. 1. Зависимости деформаций от напряжений, возникающих при разрыве образцов, полученных при тепловых режимах 0,1, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 и 9

испытания на разрыв образцов, полученных по режимам 3, 4, 6, 7 и 9 характеризуются упругопластическим нагружением. Характер нагружения образца 0,1, полученного с применением проволоки сплошного сечения пилообразный, со значениями  $\sigma_b < 190$  МПа. Ширина зоны термического влияния образца, полученного при использовании проволоки сплошного сечения составила 10 мм.

Максимальной прочностью на разрыв обладают образцы, полученные при режиме 5 и скорости перемещения электрода 10 м/ч (рис.2), характеризующимся значением эффективной тепловой мощности дуги  $q = 2,27$  кал/с и протяженным пластическим участком кривой нагружения. На рис.2. представлены зоны термического влияния образцов, полученных при режимах 0,1 и 5. Цифрами на рис.2. показаны структурные отличия материала в направлении от центра шва к периферии: 1 – металл шва; 2 – зона сплавления и участок перегрева; 3 – участок перекристаллизации и рекристаллизации; 4 – основной металл. Как видно из рис.2 максимальная протяженность зоны термического влияния, более чем в 1,7 раза превышает таковую, полученную с применением проволоки сплошного сечения. При такой тепловой мощности существенно увеличивается протяженность участков перегрева и рекристаллизации.

Образцы, полученные при режиме 4 и имеющие прочность  $\sigma_b \approx 310$  МПа, при скорости перемещения электрода 20 м/ч, отличаются меньшей протяженностью зоны термического влияния (составляющей не более 1,1 от протяженности зоны термического влияния образцов, полученных при использовании проволоки сплошного

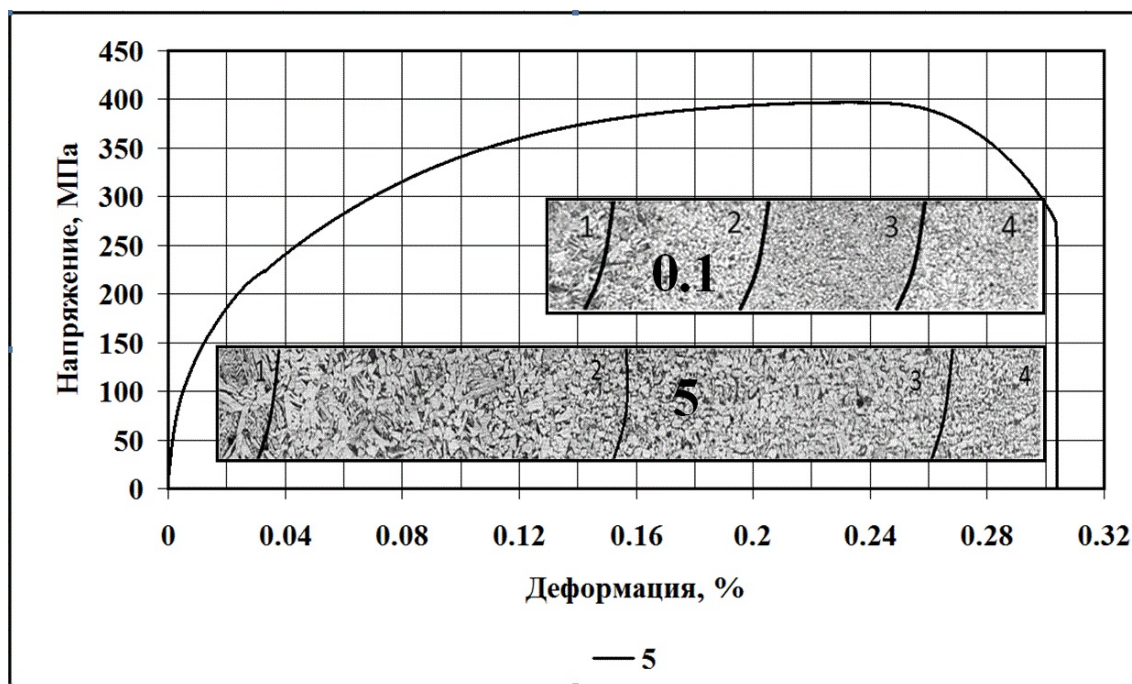


Рис. 2. Зависимость деформации от напряжения, возникающего при разрыве образца, полученного при тепловом режиме 5 и сравнение протяженности зон термического влияния образцов, полученных при использовании проволоки сплошного сечения при режиме 0.1 и проволоки с термитным наполнителем при режиме 5

сечения), а значит, по завершении релаксационных процессов будут иметь меньшую деформацию, что подтверждено экспериментальными данными [8].

Предел текучести образца, полученного при режиме 4 составил  $\sigma_B = 197$  МПа, что, с учетом применяемого понижающего коэффициента, регламентируемого ГОСТ Р 52857.1-2007, соответствует нижнему пределу прочностных требований к СтЗсп согласно ГОСТ 535-2005.

Таким образом, по результатам исследований можно заключить:

- эффективная тепловая мощность дуги при использовании СЭ<sub>1</sub> несколько ниже, чем при использовании электрода в виде проволоки сплошного сечения СЭ<sub>2</sub>;
- при меньшей площади образующегося в ходе наплавки металла проволокой порошковой с термитным наполнителем значения КСУ существенно выше, чем при использовании СЭ<sub>2</sub>;
- в аспекте достижения максимальных прочностных характеристик наиболее предпочтительным представляется режим 4 получения наплавляемого металла электродом СЭ<sub>1</sub>

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пат. 2454309 RU МПК В23К 35/368 Порошковая проволока/ И.Г. Сапченко, Е.Е. Абашкин. Оpubл. 2012. Бюл. №18



[2] Комаров О. Н., Жилин С. Г., Предеин В. В., Абашкин Е. Е., Попов А. В. Получение слэбовых заготовок из кипящей стали для прокатного производства методом металлотермии // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 3. С. 136–140.

[3] Комаров О. Н. Влияние производственных факторов при алюмотермии на свойства получаемых отливок из экспериментальных сплавов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре го-сударственного технического университета. 2018. № III-1(35). С.56–65

[4] Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н. Абашкин Е. Е. Свойства сварного шва, полученного из термитной шихты // Ученые записки КнАГТУ. 2012. № 1. С.100–105.

[5] Буренин А. А., Дац Е. П., Мурашкин Е. В. Формирование поля остаточных напряжений в условиях локального теплового воздействия // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. 2014. №2. С.124–131.

[6] Буренин А. А., Ткачева А. В., Щербатюк Г. А. К расчёту неустановившихся температурных напряжений в упругопластических телах // Вычислительная механика сплошных сред. Пермь: Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН). 2017. №3(10). С.245–259

[7] Абашкин Е. Е., Ткачева А. В., Щербатюк Г. А. Условие пластичности максимальных приведённых касательных напряжений в качестве средства расчётов эволюции плоских напряжённых состояний // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. № II - 1(34). 2018. С.51–62

[8] 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.

[9] 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.

[10] Абашкин Е. Е., Каинг М., Ткачева А. В. Температурные напряжения пластины // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. 2016. № 4(30). С.24–33.

[11] Новохацкий В. А., Жуков А. А., Макарычев Ю. И. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями. М.: Машиностроение, 1986. 64 с.

*E. E. Abashkin, S. G. Zhilin, O. N. Komarov, N. A. Bogdanova*

**THE INFLUENCE OF THERMAL MODE ON THE STRESS-DEFORMED  
STATE ELEMENTS ONE-PEACE METAL-CONSTRUCTION OBTAINED IN  
ELECTRIC ARC AND ALUMOTHERMAL IMPACT**

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

**Abstract.** Enterprises focused on obtaining one-piece metal structures that characterize by long-term operational strength, have significant competitive advantages, provided technologies that reduce resource consumption are used. Among these technological solutions is the process of obtaining a weld seam, which is formed due to the heat released as a result of joint electric arc and aluminothermic influences. Local heating is provided by feed to the joint area the surfaces of an extended rod-electrode (SE) made in the form of a steel shell with a thermite powder filler that consist of a mixture of iron oxide, a reducing agent and alloying components. The materials of such a mixture are mainly waste from the enterprises of the machine-building and metallurgical complex, which makes it possible to ensure their return to production. The main purpose of the work is the experimental determination the parameters of the thermal mode, at which the required strength characteristics of an one-piece joint are achieved. In this work are presented results of the experiment in which the influence of the energy effect on the stress-strain state and the strength characteristics of the obtained one-piece joint is determined.

**Keywords:** mechanical engineering waste, electric arc impact, aluminothermic reaction, thermal mode, heat-affected zone, stress-strain state, one-piece joint, fracture, strength

**REFERENCES**

- [1] Pat. 2454309 RU MPK V23K 35/368 Poroshkovaya provoloka/ I.G. Sapchenko, E.E. Abashkin. Opubl. 2012. Byul. №18 (in Russian)
- [2] Komarov O. N., Zhilin S. G., Predein V. V., Abashkin E. E., Popov A. V. Poluchenie slyabovyh zagotovok iz kipyashchej stali dlya prokatnogo proizvodstva metodom metallotermii // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2017. T. 15. № 3. S. 136–140. (in Russian)
- [3] Komarov O. N. Vliyanie proizvodstvennyh faktorov pri alyumotermii na svojstva poluchaemyh otlivok iz ehksperimental'nyh splavov // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure go-sudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. № III-1(35). S.56–65. (in Russian)

---

*Abashkin Evgenij Evgen'evich*

e-mail: abashkine@mail.ru, Junior Researcher. Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia,

*Zhilin Sergey Gennadevich*

e-mail: zhilin@imim.ru, Ph. D., Assoc. Prof., Leading Researcher. Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia,

*Komarov Oleg Nikolaevitsch*

e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru, Ph. D., Assoc. Prof., Leading Researcher. Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia,

*Bogdanova Nina Anatolievna*

e-mail: joyful289@inbox.ru, Junior Researcher. Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

[4] Sapchenko I. G., ZHilin S. G., Komarov O. N., Abashkin E. E. Svoystva svarnogo shva, poluchennogo iz termitnoj shihty // Uchenye zapiski KnAGTU. 2012. № 1. S.100–105. (in Russian)

[5] Burenin A. A., Dac E. P., Murashkin E. V. Formirovanie polya ostatochnyh napryazhenij v usloviyah lokal'nogo teplovogo vozdejstviya // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tvyordogo tela. 2014. №2. S.124–131. (in Russian)

[6] Burenin A. A., Tkacheva A. V., SHCHerbatyuk G. A. K raschyotu neustanovivshihsy temperaturnyh napryazhenij v uprugopla-sticheskih telah // Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred. Perm': Institut mekhaniki sploshnyh sred Ural'skogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk (IMSS UrO RAN). 2017. №3(10). S.245–259. (in Russian)

[7] Abashkin E. E., Tkacheva A. V., SHCHerbatyuk G. A. Uslovie plastichnosti maksimal'nyh pri-vedyonnyh kasatel'nyh napryazhenij v kachestve sredstva raschyotov ehvolucii ploskih napryazhyonnyh sostoyanij // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. № II - 1(34). 2018. S.51–62. (in Russian)

[8] Abashkin E. E., ZHilin S. G., Komarov O. N., Tkacheva A. V. Vliyanie teplovogo rezhima sovmestnogo ehlektrodugovogo i alyumotermicheskogo vozdejstviya na formirovanie struktury i svoystv naplavlyaemogo metalla // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie. 2018. T. 20. № 2. S. 62–74. (in Russian)

[9] Abashkin E. E., ZHilin S. G., Komarov O. N. Vliyanie upakovki komponentov termitnogo napolnitelya poroshkovej provoloki na processy ehlektrodugovogo pereplava // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. T.1. № 1(33). S.96–104. (in Russian)

[10] Abashkin E. E., Kaing M., Tkacheva A. V. Temperaturnye napryazheniya plastiny // Vestnik CHGPU im. I. YA. YAKovleva Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya. 2016. № 4(30). S.24–33. (in Russian)

[11] Novohackij V. A., ZHukov A. A., Makarychev YU. I. Maloothodnaya tekhnologiya proizvodstva stal'nyh otlivok s ehkzotermicheskimi pribylyami. M.: Mashinostroenie, 1986. 64 s. (in Russian)