



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)











## Исследование влияния энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами и управляющих алгоритмов их изменения на характеристики ударной вязкости и трещиностойкости получаемых сварных соединений

Юрий Сараев<sup>1, a, \*</sup>, Сергей Gladковский<sup>2, b</sup>, Сергей Лепихин<sup>2, c</sup>, Иван Каманцев<sup>2, d</sup>,  
 Алексей Лунёв<sup>1, e</sup>, Марина Перовская<sup>1, f</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

<sup>2</sup> Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-9457-4309>,  [litsin@ispms.tsc.ru](mailto:litsin@ispms.tsc.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-3542-6242>,  [gsu@imach.uran.ru](mailto:gsu@imach.uran.ru),

<sup>c</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-0240-2164>,  [lsu@imach.uran.ru](mailto:lsu@imach.uran.ru), <sup>d</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-0775-4043>,  [ks@imach.uran.ru](mailto:ks@imach.uran.ru),

<sup>e</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-0777-5357>,  [agl@ispms.tsc.ru](mailto:agl@ispms.tsc.ru), <sup>f</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-2780-6023>,  [mv\\_perovskaya@inbox.ru](mailto:mv_perovskaya@inbox.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.03

#### История статьи:

Поступила: 17 марта 2018

Рецензирование: 27 марта 2018

Принята к печати: 09 апреля 2018

Доступно онлайн: 15 июня 2018

#### Ключевые слова:

Сварка, наплавка

Разрушение

Ударная вязкость

Трещиностойкость

Энергетические параметры

Дуга, сварные соединения

#### Благодарности:

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИМАШ УрО РАН В.Е. Веселовой за выполненные фратографические исследования изломов и С.В. Кутеневой за проведенный количественный металлографический анализ сварных соединений с использованием оборудования ОАО «Уралтурбо» (г. Екатеринбург). Представленные в статье результаты исследований получены с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

#### Финансирование:

Работа выполнена в 2017 году за счет средств гранта РНФ по проекту №16-19-10010.

### АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Повышение требований к эксплуатационным характеристикам сварных конструкций в машиностроении, строительной промышленности, судостроении, трубопроводном транспорте обуславливает использование высокопрочных низколегированных сталей. Основным способом, применяемым при монтаже металлоконструкций, является дуговая сварка, оказывающая существенное влияние на свойства зоны сварного соединения, её структуру и механические характеристики. При этом всегда существует риск возникновения в зоне сварного соединения различных дефектов, природа появления которых разнообразна и труднопредсказуема. **Цель исследований:** изыскание путей повышения эксплуатационных характеристик в конструкциях ответственного назначения за счет установления взаимосвязи влияния энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами и управляющих алгоритмов их изменения со структурой металла шва и зоны термического влияния, а также характеристиками ударной вязкости и трещиностойкости получаемых сварных соединений. **Методика экспериментального исследования:** для проведения испытаний были изготовлены образцы из стали 09Г2С, полученные ручной дуговой сваркой на режимах постоянного тока (СПТ) и низкочастотной модуляции тока (СМТ). Для изучения структуры сварных швов (СПШ), зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ) стали 09Г2С использовали оптическую микроскопию, совмещенную с анализатором изображений. В ходе исследований определяли средний размер зерна. Фратографический анализ изломов различных участков проводили с применением растровой электронной микроскопии. **Результаты работы.** Произведена оценка влияния энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами на характеристики ударной вязкости и трещиностойкости сварных соединений как основных показателей эксплуатационных характеристик конструкций ответственного назначения. **Установлена взаимосвязь** энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами и управляющих алгоритмов их изменения со структурой металла шва и зоны термического влияния. **Показано, что импульсный характер** изменения энергетических параметров режима сварки оказывает благоприятное воздействие на теплосодержание расплава сварочной ванны и условия её кристаллизации. **Испытания металла ЗТВ** сварных соединений стали 09Г2С на статическую трещиностойкость показали, что все исследуемые соединения имеют высокие показатели во всем диапазоне температур: начиная от +20 °С и заканчивая –60 °С, даже при наличии дефектов в виде усталостных трещин. **Установлено** эффективное влияние сварки, выполняемой в режиме низкочастотной модуляции тока, по сравнению со сваркой на постоянном токе, на сопротивление хрупкому разрушению сварных соединений из низкоуглеродистых сталей при пониженных климатических температурах.

**Для цитирования:** Исследование влияния энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами и управляющих алгоритмов их изменения на характеристики ударной вязкости и трещиностойкости получаемых сварных соединений / Ю.Н. Сараев, С.В. Гладковский, С.В. Лепихин, И.С. Каманцев, А.Г. Лунев, М.В. Перовская // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 100–115. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-100-115.

**\*Адрес для переписки**

Сараев Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, 634055, г. Томск, Россия  
Тел.: 8 (3822)492-942, e-mail: litsin@ispms.ru

## Введение

В связи с возрастающими требованиями к эксплуатационным характеристикам сварных конструкций в машиностроении, строительной промышленности, судостроении, трубопроводном транспорте используются высокопрочные низколегированные стали [1]. При этом в процессе их сварки при монтаже металлоконструкций существует риск возникновения в зоне сварного соединения различных дефектов, природа появления которых разнообразна и труднопредсказуема [2]. Анализ научно-технической литературы, посвященной вопросам прочности и надежности металлоконструкций ответственного назначения [3, 4], позволяет выделить несколько перспективных направлений исследований, в ходе которых изучаются различные стадии формирования неразъемных соединений, в том числе стадий возможного поглощения расплавленным металлом водорода из атмосферы дуги [4–6], стадий плавления электрода, учитывающих температуру металла, наличие слоя шлака, характер переноса электродного металла в сварочную ванну и другие технологические особенности [7].

В работах [8–10] была проведена оценка влияния динамических свойств источников питания на разбрызгивание. При прочих равных условиях было установлено, что разбрызгивание снижается при использовании источников питания, реализующих высокочастотное преобразование энергии (имеющих более высокие динамические характеристики по сравнению с традиционными сварочными выпрямителями) [11]. Вместе с тем до сих пор остаются малоизученными вопросы, касающиеся физической природы формирования структуры, фазового и химического состава сварных соединений. Эти процессы, по мнению многих исследователей [12–14], связа-

ны с теплосодержанием металла сварочной ванны и скоростью ее кристаллизации, зависящей, с одной стороны, от баланса энергий, идущих на плавление основного и присадочного материала, а с другой – от теплосодержания капель электродного металла [15].

В свою очередь, теплосодержание капель электродного металла зависит от энергетических показателей дуги как источника нагрева, а также от времени пребывания капли расплавленного металла, находящейся на торце расплавляемого электрода. Вместе с тем известно, что длительность короткого замыкания связана с размерами переносимых капель [16].

**Цель исследований:** изыскание путей повышения эксплуатационных характеристик в конструкциях ответственного назначения за счет установления взаимосвязи влияния энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами и управляющих алгоритмов их изменения со структурой металла шва и зоной термического влияния, а также характеристиками ударной вязкости и трещиностойкости получаемых сварных соединений.

## Методика экспериментального исследования

Для проведения исследований осуществляли сварку пластин из листовой стали 09Г2С размером 150×300×12 мм с углом скоса кромок  $(25 \pm 2)^\circ$ . Стык собирали с зазором 2,5...3,0 мм. Для исключения коробления пластин в процессе сварки и после ее завершения использовали специальный кондуктор. Сварку производили в три прохода с использованием электродов диаметром 3 мм – для сварки корневых швов (КШ) и 4 мм – для сварки заполняющих (ЗШ) и облицовочных швов (ОШ), химический состав которых приведен в табл. 1. Конструктивные

Таблица 1

Table 1

**Электроды, применяемые при сварке образцов**
**Electrodes, used at the welding of specimens**

Марка электрода / Electrode classification	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Mo, %	S, %	P, %	KCV, Дж/см <sup>2</sup> / KCV, J/cm <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , МПа / strength limit, MPa
УОНИ-13/МОРОЗ, 3 и 4 мм, Россия	0,075	0,3	0,7	2,8	–	0,010	0,017	210	660
LB-52U, 3 мм, Япония	0,06	0,52	1,01	0,01	0,01	0,005	0,011	100 при –40°C	540
LB-62D, 4 мм, Япония	0,06	0,61	1,25	0,57	0,25	0,005	0,011	150 при –20°C	650

элементы сварного соединения соответствовали ГОСТ 5264–80.

Для проведения испытаний было изготовлено 12 сварных пластин размером 300 × 300 × 12 мм из стали 09Г2С, полученных ручной дуговой сваркой на режимах постоянного тока (СПТ) и низкочастотной модуляции тока (СМТ) с применением пяти марок отечественных и одной марки зарубежных производителей. После предварительной оценки характеристик тепломассопереноса и технологических свойств электродов [10] для продолжения экспериментов были оставлены одна марка отечественного и две марки зарубежных электродов.

Сварка производилась с применением сварочного источника питания ФЭБ-315 «МАГМА», оснащенного пультом дистанционного управления «Пульс», обеспечивающего реализацию импульсно-дугового процесса сварки. Для изучения структуры сварных швов (СШ), зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ) стали 09Г2С использовали оптический микроскоп *Meiji IM 7200*, оснащенный анализатором изображений *Thixomet Pro*. Средний размер зерна определяли в соответствии с ГОСТ 5639–82. Фрактографический анализ изломов различных участков проводили на растровом электронном микроскопе *TESCAN VEGA II XMU*.

Испытания металла СШ, ЗТВ и ОМ на ударный изгиб проводились на образцах тип IX по ГОСТ 6996–66 с использованием инструментированного маятникового копра «*Tinius Olsen*» *IT542*. Значения статической трещиностойкости

(вязкости разрушения) определялись на испытательной машине *INSTRON 8801* при температурах 20 и –60 °С по ГОСТ 25.506–85 на образцах тип 3 толщиной 10 мм с предварительно созданной на высокочастотной резонансной машине *MIKROTRON* усталостной трещиной. Разброс значений механических характеристик по результатам испытаний трех идентичных образцов на ударную вязкость и статическую трещиностойкость не превышал 5 и 2,5 % соответственно.

В процессе сварки производили регистрацию основных энергетических параметров (тока и напряжения дуги) при помощи цифрового запоминающего осциллографа «АКИП-4122/1V», дифференциального пробника «*Pintek Electronics* «DP-50» и токосъемного блока «*Current probe PR 1030*». Энергетические параметры режимов ручной дуговой сварки покрытыми электродами представлены в табл. 2.

Полученные результаты обрабатывали с применением программы «*OWON\_Oscilloscope\_2.0.8.26*». Регистрацию термических циклов производили тепловизором «*Therma CAM<sup>TM</sup> P65HS*». В ходе технологического эксперимента оценивали время сварки и рассчитывали среднее тепловложение в соответствии с общепринятой методикой. Характерные осциллограммы тока в сварочной цепи и напряжения на межэлектродном промежутке, записанные в ходе технологических экспериментов, приведены в табл. 3.

Результаты статистической обработки осциллограмм тока и напряжения представлены на рис. 1–4 в виде усредненных показателей мас-

**Энергетические параметры режимов сварки**  
**Energy parameters of welding modes**

Род тока, номер образцов / Current type, No specimen	Электрод / Electrode	Слой шва / Weld layer	Среднее напряжение, В / Average voltage, V	Средний ток, А / Average current, A	Количество КЗ / Short circuit number	Длительность КЗ, мс / Short circuit duration, ms	Коэффициент вариации длительности КЗ / Variation coefficient of short circuit duration	Средний ток КЗ А / Short circuit average value, A	Погонная энергия, кДж/м / Heat input, kJ/m
СПТ 1	УОНИ-13/мороз	КШ	20,5	82,8	75	5,6	0,35	115,1	1357
		ЗШ	24,4	146,2	30	7,6	0,27	216,9	2029
		ОШ	23,1	158	43	7,1	0,28	222,3	2121
СМТ 2	УОНИ-13/мороз	КШ	19,9	92,5	62	5,9	0,39	160	1286
		ЗШ	22,5	134,9	25	9,3	0,49	245	1868
		ОШ	21,7	150,5	43	6,6	0,41	271	1925
СПТ 3	LB-52U	КШ	22,5	95,2	27	5,1	0,28	136,5	1040
	LB-62D	ЗШ	22	159,6	32	12,2	0,34	224,8	2042
		ОШ	22,5	172,5	34	12	0,34	244,1	1691
СМТ 4	LB-52U	КШ	19,5	95,9	51	5,4	0,33	163	995
	LB-62D	ЗШ	20,8	150,6	24	10,9	0,37	66	2192
		ОШ	21,9	161,2	30	10,1	0,33	282	2575

сопереноса: количества коротких замыканий и их длительностей, коэффициента вариации длительности коротких замыканий и значений погонной энергии при сварке.

### Результаты и их обсуждение

Основной задачей при выполнении исследований, требующей решения при исследовании тепломассопереноса при дуговой сварке, является обоснование условий, при которых происходит формирование неразъемного соединения. Нагрев и охлаждение обрабатываемого изделия вызывают разнообразные физические и химические процессы в самом материале: плавление, перенос электродного металла, кристаллизация

расплава, напряжения и деформации, возникающие в зоне неразъемного соединения и определяющие эксплуатационные показатели всего изделия [17].

Основными показателями тепломассопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом являются: частота перехода электродного металла в сварочную ванну в виде отдельных капель, их теплосодержание, длительность их нагрева до момента отрыва от электрода. Для случая сварки с короткими замыканиями дугового промежутка важным показателем стабильности тепломассопереноса является коэффициент вариации длительностей коротких замыканий [18]. Кроме того, одним из основных показателей, отражающих изменение во времени нагрева



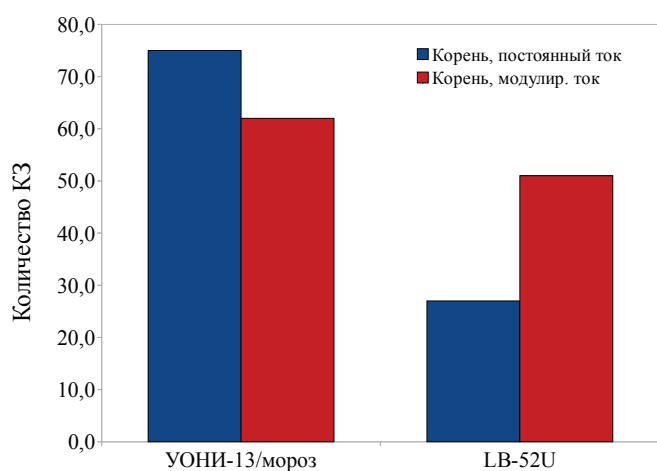
Таблица 3

Table 3

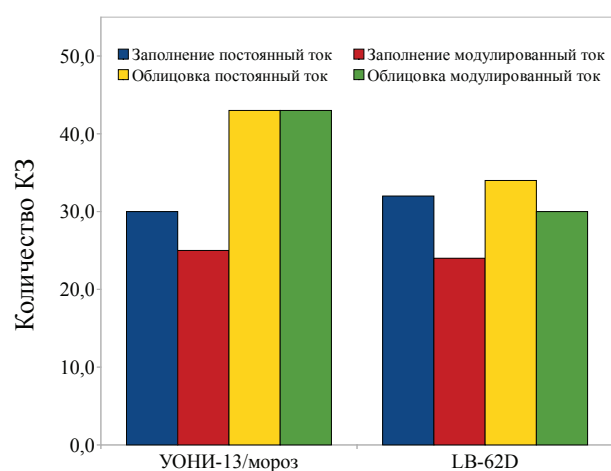
Осциллограммы тока в сварочной цепи и напряжения на межэлектродном промежутке

Oscillogram of current in arc-welding circuit and electrode gap voltage

Номер образца / No specimen	Электрод / Electrode	Сварка на постоянном токе / Direct-current welding	Сварка модулированным током / Modulated current welding
СПТ 1 СМТ 2	УОНИ 13/ мороз, 4 мм.		
СПТ 3 СМТ 4	LB-62D, 4 мм		



а



б

Рис. 1. Количество коротких замыканий за 10 с:

а – сварка КШ электродами диаметром 3 мм; б – сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм

Fig. 1. Number of short circuit during 10 seconds:

а – welding of the root with 3 mm electrodes; б – welding of the filling and capping with 4 mm electrodes

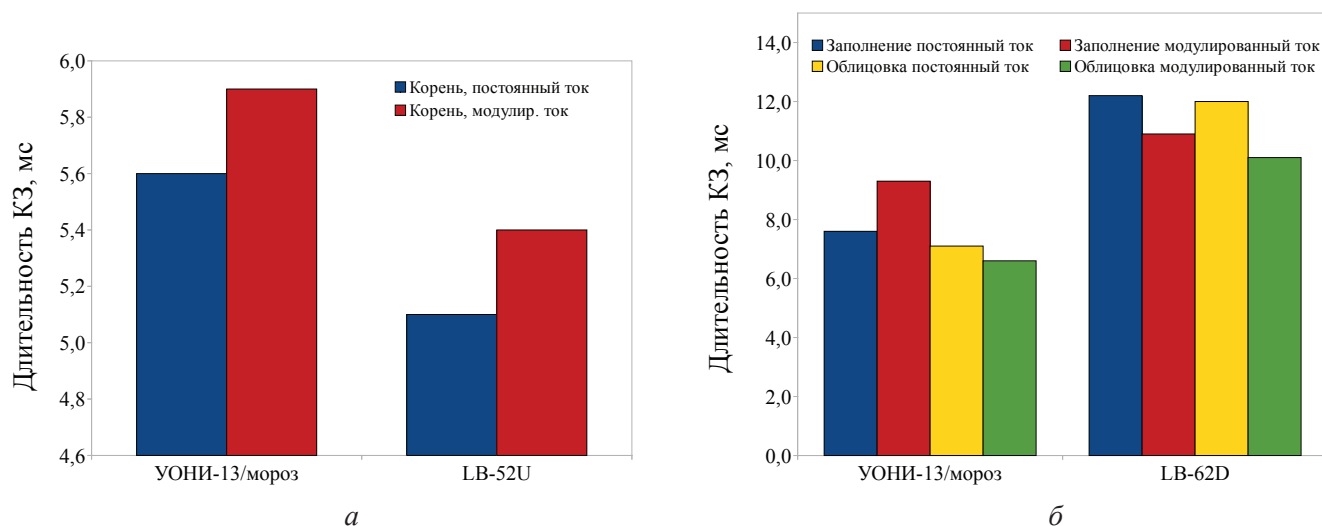


Рис. 2. Длительность коротких замыканий:

*a* – сварка КШ электродами диаметром 3 мм; *б* – сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм

Fig. 2. Short circuit duration:

*a* – welding of the root with 3 mm electrodes; *б* – welding of the filling and capping with 4 mm electrodes

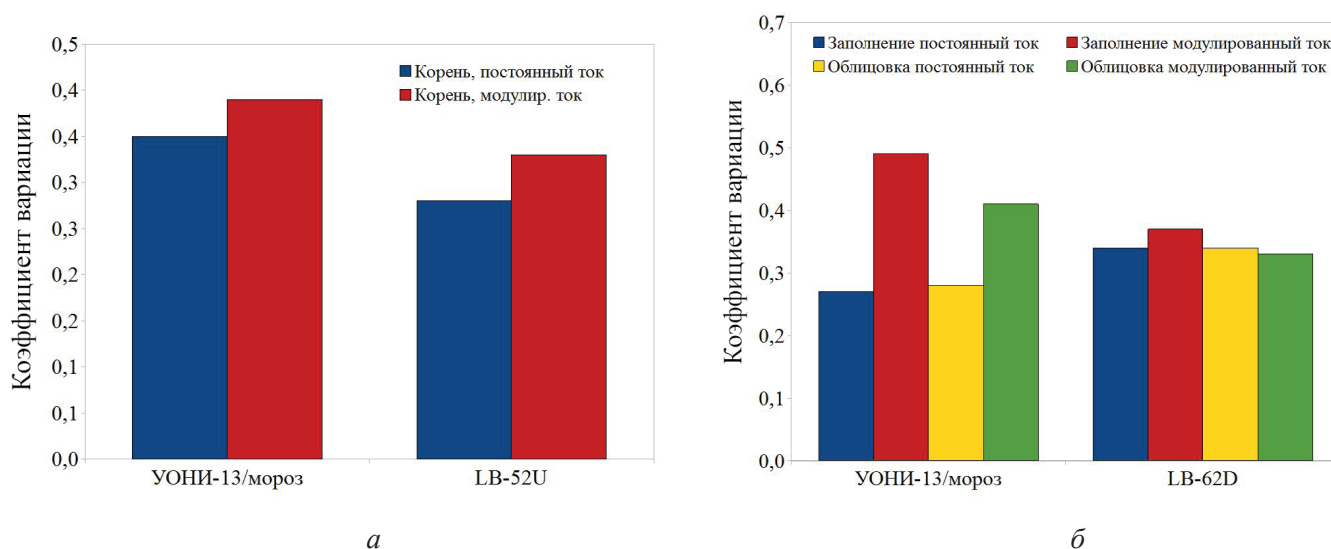


Рис. 3. Коэффициент вариации длительности коротких замыканий:

*a* – сварка КШ электродами диаметром 3 мм; *б* – сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм

Fig. 3. Variation coefficient of short-current duration:

*a* – welding of root joint with 3 mm electrodes; *б* – welding of filling and capping joints with 4 mm electrodes

и остывания обрабатываемого металла, может быть термический цикл сварки [19]. Как правило, весь процесс сварки может характеризоваться семейством кривых термических циклов, которые можно получить обработкой результатов тепловизионной съемки. Важным показателем затрачиваемой энергии при формировании неразъемного соединения является погонная энергия, которая рассчитывалась в соответствии с общепринятой методикой [20].

Более детализованная оценка характеристик тепломассопереноса была сделана в работе [10]. Было установлено, что на их показатели оказывают влияние не только энергетические характеристики процесса сварки и способ сварки (СПТ или СМТ), но и тип сварочных электродов, в том числе их химический состав и качество изготовления [21].

Типичная микроструктура изученных сварных соединений по горизонтальному сечению

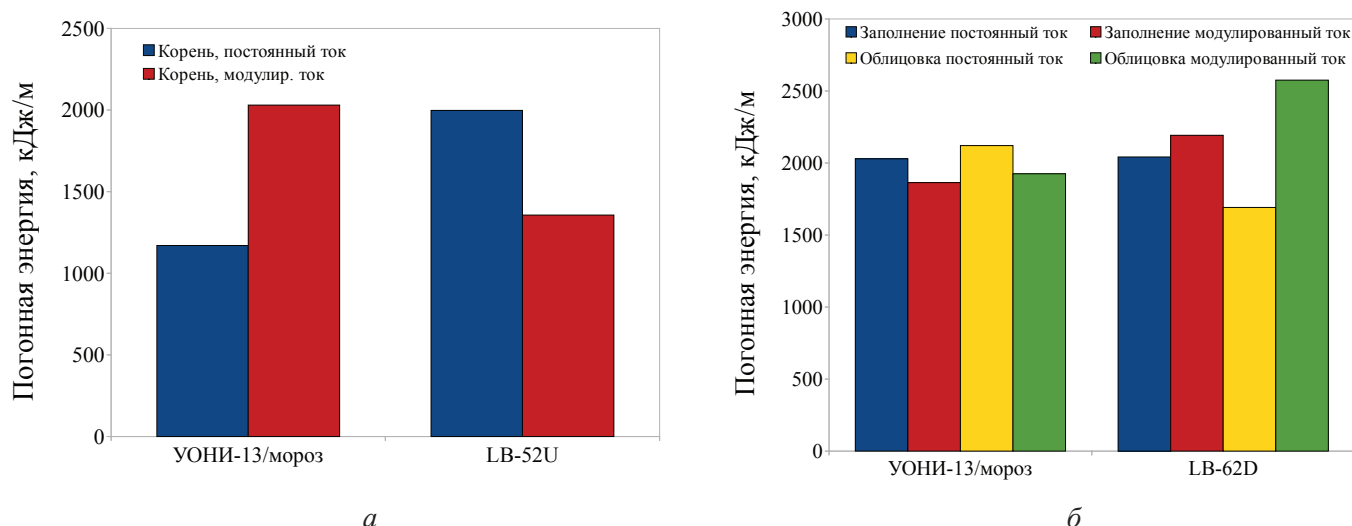


Рис. 4. Погонная энергия, затраченная при сварке:

*a* – сварка КШ электродами диаметром 3 мм; *б* – сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм

Fig. 4. Heat input spent at welding:

*a* – welding of root joint with 3 mm electrodes; *б* – welding of filling and capping joints with 4 mm electrodes

центральной части металлографических образцов на примере соединения серии 4 представлена на рис. 5. Структура ОМ стали 09Г2С представляет собой ферритно-перлитную смесь с объемной долей ферритной составляющей  $f_{об} = 68\%$  и размером ферритного зерна  $d_{\phi}$ , варьирующимся в пределах  $d_{\phi} = 5,02...10,40$  мкм. Методом количественной металлографии установлено, что объемная доля и средний размер зерен феррита в ЗТВ изученных сварных соединений серий 1, 2, 3 и 4 меняются незначительно и находятся в пределах  $f_{об} = 66...69\%$  и

$d_{\phi} = 3,29...6,58$  мкм. Металл СШ образцов серий 1 и 2 имеет дендритоподобную структуру, представленную на рис. 6, а металл СШ образцов серий 3 и 4 характеризуется ферритно-перлитной структурой (рис. 5, *a*). В металле СШ сварных соединений серий 3 и 4 объемная доля феррита и размер ферритного зерна составляют  $f_{об} = 60...66\%$  и  $d_{\phi} = 5,24...5,36$  мкм соответственно. В ЗТВ образцов серий 3 и 4 структура более дисперсна по сравнению с основным металлом и сварным швом. Как видно из рис. 5, для различных участков сварного соединения

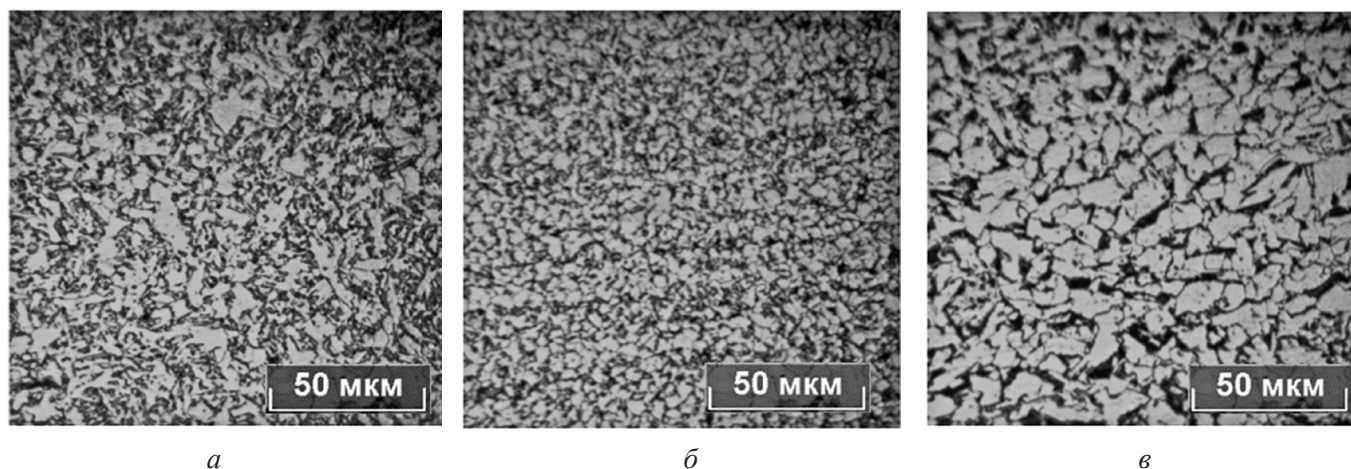


Рис. 5. Микроструктура сварного соединения серии 4 (СМТ):

СШ (*a*), ЗТВ (*б*) и ОМ (*в*)

Fig. 5. Microstructure of specimens (4<sup>th</sup> set of experiments):

joint (*a*), heat-affected zone (*б*), base metal (*в*)

серии 4 наиболее дисперсная структура со средним размером ферритного зерна  $d_f = 3,93$  мкм наблюдается в ЗТВ.

Металлографический анализ выявил заметное различие в микроструктуре СШ сварных соединений серий 1 и 2 (рис. 6). Так, у образца серии 1 (СПТ) дендритоподобная структура содержит зерна больших размеров по сравнению с микроструктурными элементами образца серии 2 (СМТ). Размеры дендритоподобных зерен во втором случае меньше, что подтверждает ранее установленный эффект рафинирования структуры в результате импульсного изменения энергетических параметров режима сварки. При этом сравнение микроструктуры СШ образцов серии 2 (СМТ, электрод УОНИ 13/Мороз) и серии 4 (СМТ, электроды LB-52U и LB-62D) показывает, что структурные элементы в металле шва имеют примерно одинаковые размеры, несмотря на то что во втором случае значения погонной энергии были выше (рис. 6, б и 5, а соответственно).

Согласно приведенным на рис. 7 результатам ударных испытаний основного металла и металла ЗТВ изученных сварных соединений серий 1 и 2 и особенно серий 3 и 4 они не обладают выраженным порогом хладноломкости. Установлено, что наиболее высокие значения ударной вязкости  $KCV = 1,02...2,25$  МДж/м<sup>2</sup> металла ЗТВ в интервале температур испытаний от комнатной до  $-20$  °С наблюдается на образцах серии 2 сварного соединения, полученного сваркой с модуляцией тока (СМТ), с использованием никельсодержащего электрода УОНИ-13/мороз.

Следует отметить, что ударная вязкость металла ЗТВ независимо от способа получения

сварного соединения при температурах испытаний до  $-40$  °С превышает значения  $KCV$  основного металла. Уровень ударной вязкости металла ЗТВ сварных соединения серий 3 и 4, полученных с использованием электродов марки LB52U (корневой слой шва) и LB62D (заполняющий и облицовочный слой), практически не зависит от способа получения сварного соединения (СПТ или СМТ). Значения ударной вязкости образцов серий 3 и 4 сопоставимы с ударной вязкостью ОМ, и при температурах испытаний до  $-20$  °С они существенно ниже, чем у образцов серий 1 и 2. При температурах испытаний  $-60$  °С уровень ударной вязкости всех изученных образцов ОМ и ЗТВ уравнивается и находится в пределах  $KCV = 0,17...0,43$  МДж/м<sup>2</sup>. Однако в металле ЗТВ наибольшие значения  $KCV^{-60} = 0,36...0,43$  МДж/м<sup>2</sup> достигаются на сварных соединениях серий 3 и 4 независимо от использованного способа сварки.

Согласно результатам изучения макро- и микростроения поверхностей изломов наиболее вязких образцов сварных соединений серий 1 и 2 с понижением температуры испытаний от  $20$  до  $-60$  °С на изломах уменьшается ширина зоны боковой утяжки, свидетельствующей о вкладе пластической деформации в процесс разрушения образцов (рис. 8, а–е). На микроуровне наблюдается смена типа излома от вязкого ямочного (рис. 8, ж) до смешанного, включающего вязкие ямки и фасетки квазискола (рис. 8, з–и), и далее с понижением температуры испытаний до излома по типу квазискола (рис. 8, и–л) и скола с развитым ручьи́стым рельефом (рис. 8, м), характерным для хрупкого механизма разруше-

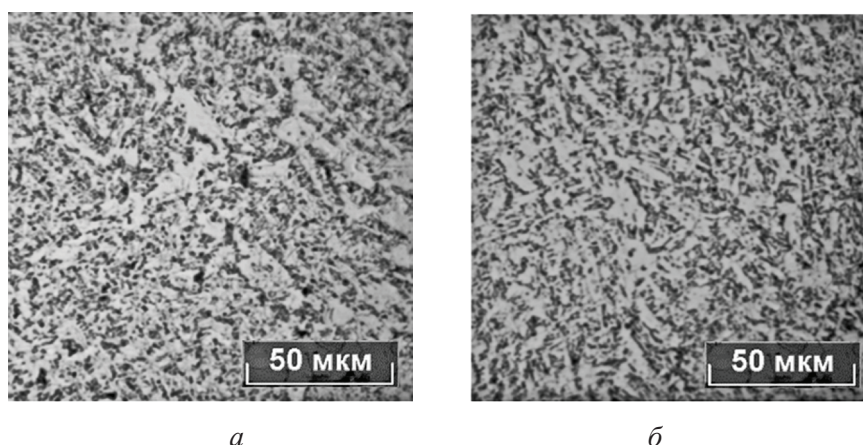


Рис. 6. Микроструктура СШ сварных соединений серии 1 (а) и 2 (б)

Fig. 6. Joint microstructure 1<sup>st</sup> (a) and 2<sup>nd</sup> set of experiments (b)



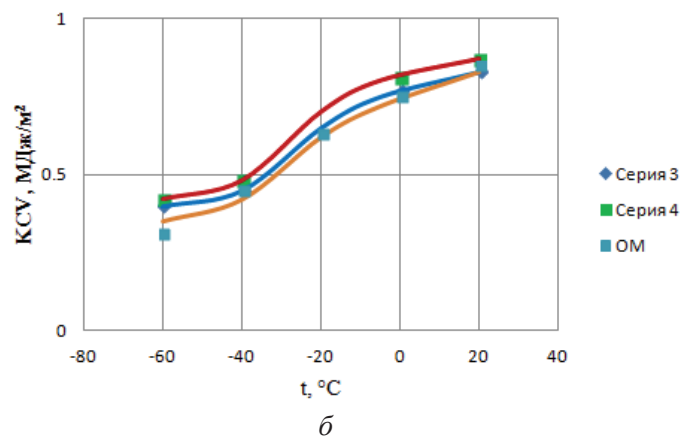
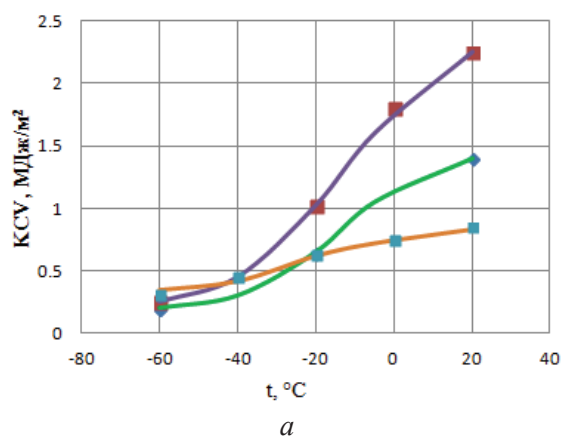


Рис. 7. Температурные зависимости ударной вязкости ОМ и металла ЗТВ сварных соединений серий 1, 2 (а); 3, 4 (б)

Fig. 7. Temperature dependencies of impact strength of base metal and heat-affected zone (1, 2, 3, 4 set of experiments)

ния. Изменение механизмов разрушения в изученных образцах сопровождается снижением значений ударной вязкости в пределах от 2,25 до 0,17 МДж/м<sup>2</sup>. При этом в условиях промежуточных температур испытания (–20 °С) в образцах серии 2 (СМТ) на поверхности разрушения сохраняется заметная доля вязкой ямочной составляющей (рис. 8, з), а в изломе образцов серии 1 (СПТ) преобладает полностью хрупкий квазискольный рельеф поверхности разрушения (рис. 8, к).

Результаты приведенных в табл. 4 испытаний ОМ и металла ЗТВ сварных соединения серий 1, 2 и 3, 4 на статическую трещиностойкость при комнатной (20 °С) и пониженной (–60 °С) температурах указывают на то, что все изученные образцы сварных соединений при температурах 20 и –60 °С характеризуются достаточно высоким уровнем сопротивления хрупкому разрушению, оцениваемому по критерию  $K_c^*$  (критическое значение интенсивности напряжений в вершине трещины в условиях плоского напряженного состояния). При этом значения статической трещиностойкости металла ЗТВ сварных соединений серий 1 и 2 при  $K_c = 83,2 \dots 84,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  ( $t = 20 \text{ °С}$ ) и  $K_c = 92,2 \dots 94,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  ( $t = -60 \text{ °С}$ ) при комнатной и пониженной температурах превышают статическую трещиностойкость основного металла при 20 и –60 °С ( $K_c = 74,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  и  $K_c = 83,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  соответственно).

Наблюдаемый на всех образцах нетипичный рост значений  $K_c$  с понижением температуры испытаний от комнатной до –60 °С можно объяснить изменением условий выполнения плоской

деформации при испытаниях на статическую трещиностойкость, вызванных ростом условного предела текучести металла с понижением температуры [22]. При этом наиболее высокое сопротивление хрупкому разрушению при –60 °С ( $K_c = 94,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) достигается на металле ЗТВ сварных соединений серии 2, полученной сваркой с модуляцией тока. Статическая трещиностойкость металла ЗТВ сварных соединений серий 1 и 2 при комнатной и пониженной температурах превышает соответствующие значения параметра  $K_c$  сварных соединений серий 3 и 4, что хорошо согласуется с результатами испытаний на ударную вязкость, табл. 4 и рис. 7.

Как показано на примере наиболее вязких образцов металла ЗТВ сварного соединения серии 2, даже при достаточно высоких значениях показателя статической трещиностойкости при температуре –60 °С ( $K_c = 94,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) в изломе образца отсутствуют боковые пластические утяжки (рис. 9, а), а в зоне статического роста трещины 4 преобладает квазискольный рельеф разрушения (рис. 9, б), характеризующийся повышенной энергоемкостью.

Значения  $K_c$  металла ЗТВ образцов сварных соединений серий 3 и 4 при 20 и –60 °С несколько ниже по сравнению с основным металлом, но вполне сопоставимы с ними и соответствуют достаточно высокому уровню сопротивления материала хрупкому разрушению (табл. 4).

Значения  $K_c$  металла ЗТВ образцов сварных соединений серий 3 и 4 при 20 и –60 °С несколько ниже по сравнению с основным металлом, но

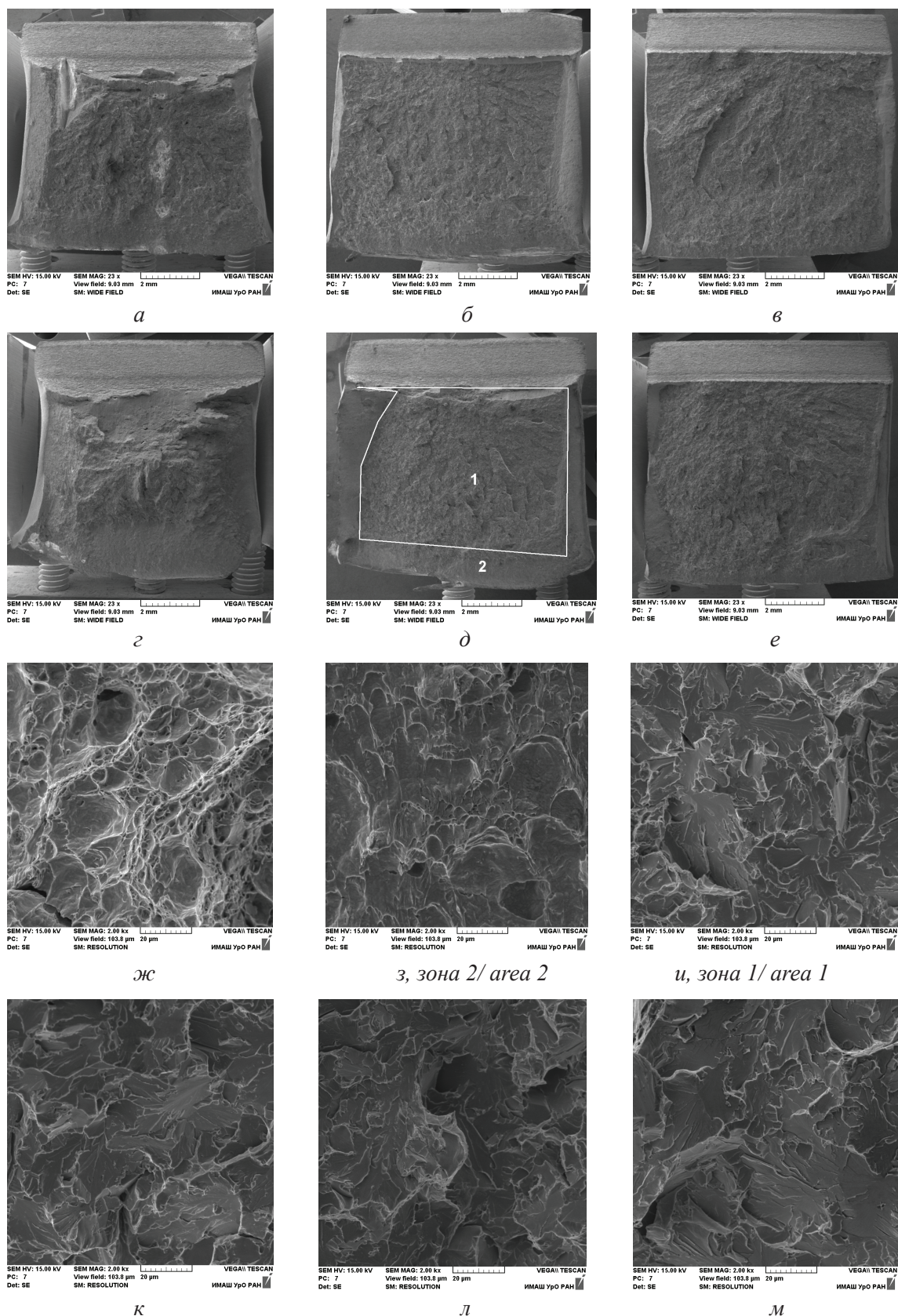


Рис. 8. Строение изломов ударных образцов металла ЗТВ серии 1 (*а, б, в, к, м*) и 2 (*г, д, е, ж, з, и, л*) при температурах испытаний:

20 °C (*а, г, ж*); -20 °C (*б, д, з, и, к*) и -60 °C (*в, е, л, м*)

Fig. 8. Fracture structures (heat-affected zone) of the specimens after impact strength testing, 1<sup>st</sup> set of experiments – *а, б, в, к, м* and 2<sup>nd</sup> set of experiments – *г, д, е, ж, з, и, л*, at test temperature :

20° C (*а, г, ж*); -20° C (*б, д, з, и, к*) and -60° C (*в, е, л, м*)



Таблица 4

Table 4

Статическая трещиностойкость основного металла и металла ЗТВ сварных соединений серий 1, 2, 3, 4 при комнатной и пониженных температурах

Static crack resistance of base metal and heat-affected zone of welding joints 1-4<sup>th</sup> set of experiments at the ambient temperature and low temperature

Серия / Set of experiments	Метод сварки / Welding technique	Температура испытаний, °C / Test temperature, °C	$K_{IC}$ , МПа · м <sup>1/2</sup> / $K_{IC}$ , МПа · м <sup>1/2</sup>
ОМ	—	20	74,7 <sup>±2,5</sup>
		–60	83,3 <sup>±2,5</sup>
1	СПТ	20	83,2 <sup>±2,5</sup>
		–60	92,2 <sup>±2,5</sup>
2	СМТ	20	84,3 <sup>±2,5</sup>
		–60	94,5 <sup>±2,5</sup>
3	СПТ	20	73,7 <sup>±2,5</sup>
		–60	82,2 <sup>±2,5</sup>
4	СМТ	20	72,2 <sup>±2,5</sup>
		–60	72,2 <sup>±2,5</sup>

**Примечание.** Соответствие полученных значений статической трещиностойкости критерию  $K_{IC}$  было установлено по критерию Брауна–Сроули в соответствии с ГОСТ 25.506–85.

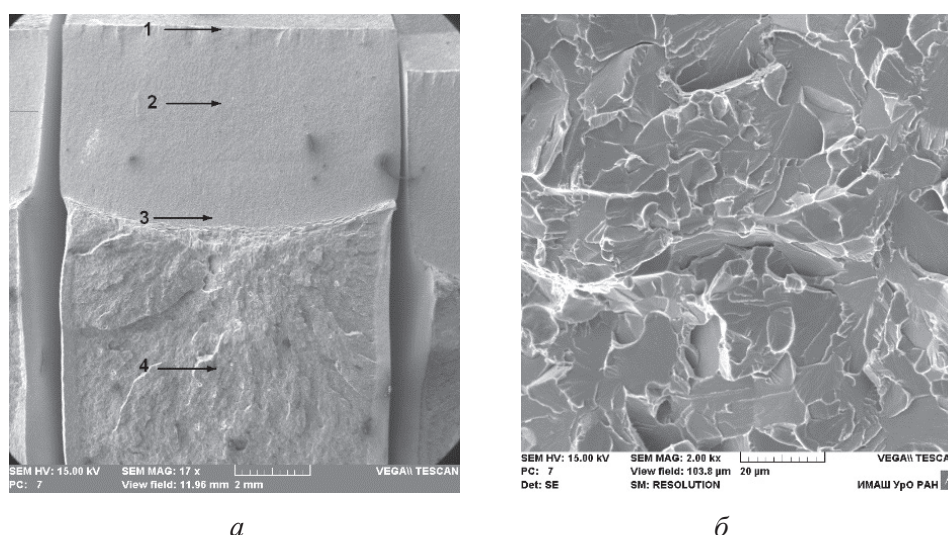


Рис. 9. Общий вид (а) и микростроение (б) излома образца металла ЗТВ сварного соединения серии 2 после испытаний на статическую трещиностойкость при –60 °C

Fig. 9 General view (a) and microstructure (b) of specimen fracture of heat-affected zone (2<sup>nd</sup> set of experiments) after static crack resistance test at temperature –60° C

вполне сопоставимы с ним и соответствуют достаточно высокому уровню сопротивления материала хрупкому разрушению (табл. 4).

### Выводы

1. Установлено, что металл изученных сварных соединений стали 09Г2С имеет ферритно-перлитную структуру за исключением металла СШ образцов серий 1 и 2, имеющих дендритоподобную структуру. Проведенный с использованием анализатора изображений Thixomet Pro количественный металлографический анализ не выявил существенных различий в размере структурных элементов металла различных участков сварных соединений стали 09Г2С, полученных методом ручной дуговой сварки на постоянном токе и с модуляцией тока с использованием одинаковых марок электродов.

2. Характеристики ударной вязкости металла ЗТВ сварных соединений серии 1 при температуре испытаний  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также ЗТВ образцов серии 2 при температуре испытаний  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше по сравнению со значениями KCV основного металла. При этом в данном температурном диапазоне металл ЗТВ сварных соединений серий 1 и 2 (электроды УОНИ-13/мороз) характеризуется более высокими значениями ударной вязкости по сравнению с образцами из металла ЗТВ сварных соединений серий 3 и 4 (электроды LB52U и LB62D).

3. На сварных соединениях серий 1 и 2 и в меньшей степени на сварных соединениях серий 3 и 4 выявлено преимущество использования технологии сварки с модуляцией тока (СМТ), обеспечивающей более высокие значения ударной вязкости металла ЗТВ в температурном диапазоне  $20\ldots-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  по сравнению со сваркой на постоянном токе (СПТ).

4. С понижением температуры ударных испытаний до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  различия в ударной вязкости ОМ и металла ЗТВ сварных соединений серий 1 и 2 становятся незначительными. Наибольшие значения  $KCV^{-60} = 0,36\ldots 0,43\text{ МДж/м}^2$ , превышающие значения ударной вязкости основного металла при этой температуре, достигаются на металле ЗТВ сварных соединений серий 3 и 4 независимо от способа сварки.

5. Выявлена взаимосвязь между макро- и микростроением изломов ударных образцов свар-

ных соединений и уровнем их ударной вязкости, проявляющаяся в существенном снижении значений KCV при смене доминирующего механизма разрушения от вязкого ямочного к квазисколу и хрупкому сколу в условиях понижения температуры испытаний от комнатной до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

6. Испытания металла ЗТВ изученных сварных соединений стали 09Г2С на статическую трещиностойкость выявили возможность их использования при комнатной и пониженной температурах в изделиях и элементах конструкций ответственного назначения при наличии дефектов в виде усталостных трещин. Установлено эффективное влияние сварки с модуляцией тока по сравнению со сваркой на постоянном токе на сопротивление хрупкому разрушению сварных соединений из низкоуглеродистых сталей при пониженных климатических температурах.

### Список литературы

1. Физико-технические проблемы современного материаловедения. В 2 т. Т. 1 / редкол.: И.К. Походня и др.; НАН Украины. – Киев: Академперіодика, 2013. – 583 с. – ISBN 978-966-360-236-3.

2. Liu C., Bhole S.D. Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties // Science and Technology of Welding and Joining. – 2013. – Vol. 18, iss. 2. – P. 169–181. – doi: 10.1179/1362171812Y.0000000090.

3. Shiga C. Problems in welded joints and systematic approach to their solution in STX21 project // Science and Technology of Welding and Joining. – 2000. – Vol. 5, iss. 6. – P. 356–364.

4. Development of new Low Transformation-Temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds / S. Zenitani, N. Hayakawa, J. Yamamoto, K. Hiraoka, Y. Morikage, T. Kubo, K. Yasuda, T. Amano // Proceedings of 2002 Symposium for Welded Structures of the Japan Welding Society. – Osaka, 2002. – P. 346–353.

5. Ogino Y., Hirata Y. Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW // Welding in the World. – 2015. – Vol. 59, iss. 4. – P. 465–473. – doi: 10.1007/s40194-015-0221-8.

6. Kannengiesser Th., Lausch Th., Kromm A. Effects of heat control on the stress build-up during high-strength steel welding under defined restraint conditions // Welding in the World. – 2011. – Vol. 55, iss. 7. – P. 58–65.

7. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Ю.Н. Сараев,



- С.В. Гладковский, Н.И. Голиков и др. // Научные технологии в проектах РНФ. Сибирь / под ред. С.Г. Псахье и Ю.П. Шаркеева. – Томск: Издательство НТЛ, 2017. – Гл. 5. – С. 134–202. – ISBN 978-5-89503-607-5.
8. Лоос А.В., Лукутин А.В., Сараев Ю.Н. Источники питания для импульсных электротехнологических процессов. – Томск: Изд-во ТПУ, 1998. – 159 с.
9. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Selivanov Yu.V. Special features of the formation of protective corrosion-resisting coatings in pulsed electric arc surfacing of austenitic steels // *Welding International*. – 2010. – Vol. 24, iss. 11. – P. 884–888. – doi: 10.1080/09507116.2010.486199.
10. Исследование влияния энергетических параметров режима дуговой сварки покрытыми электродами на стабильность тепломассопереноса / Ю.Н. Сараев, А.Г. Лунев, А.С. Киселев, А.С. Гордынец, Д.А. Нестерук, А.А. Хайдарова, Д.А. Чинахов, В.М. Семенчук // *Сварочное производство*. – 2018. – № 2. – С. 3–13.
11. Investigation of stability of melting and electrode metal transfer in consumable electrode arc welding using power sources with different dynamic characteristics / Y.N. Saraev, D.A. Chinakhov, D.I. Ilyshenko, A.S. Kiselev, A.S. Gordynets // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31, iss. 10. – P. 784–790. – doi: 10.1080/09507116.2017.1343977.
12. Hybrid 2D–3D modelling of GTA welding with filler wire addition / A. Traidia, F. Roger, E. Guyot, J. Schroeder, G. Lubineau // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – Vol. 55. – P. 3946–3963. – doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.025.
13. Wang H., Colegrove P.A., Mehnen J. Hybrid modelling of the contact gap conductance heat transfer in welding process // *Advances in Engineering Software*. – 2014. – Vol. 68. – P. 19–24. – doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.11.000.
14. Impacts of torch moving on phase change and fluid flow in weld pool of SMAW / L.G. Tong, J.C. Gu, S.W. Yin, L. Wang, S.W. Bai // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 100. – P. 949–957.
15. Походня И.К., Сунтель А.М. Теплосодержание капель при сварке в углекислом газе // *Автоматическая сварка*. – 1970. – № 7. – С. 12–17.
16. Улучшение структуры и свойств сварных соединений труб большого диаметра из низколегированной стали при импульсно-дуговой сварке / Ю.Н. Сараев, В.П. Безбородов, И.М. Полетика, А.В. Тютев, И.В. Никонова, Н.В. Кирилова, С.П. Севастьянов // *Автоматическая сварка*. – 2004. – № 12. – С. 34–38.
17. Сараев Ю.Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // *Тяжелое машиностроение*. – 2010. – № 8. – С. 14–19.
18. Ланкин Ю.Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом // *Автоматическая сварка*. – 2011. – № 1. – С. 7–15.
19. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 572 с. – ISBN 978-5-7422-4629-9.
20. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.
21. Совершенствование технологии производства электродов УОНИ-13/55 / И.Н. Ворновицкий, С.А. Горбатов, Ю.А. Глушков, Р.Б. Ктиторов // *Сварочное производство*. – 2001. – № 1. – С. 42–44.
22. Броек Д. Основы механики разрушения: пер. с англ. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)















### Investigation of the Influence of Energy Parameter of the Covered-Electrode Welding on the Impact Strength Characteristics and Cracking Resistance of the Welded Joints Obtained

*Yury Saraev<sup>1, a, \*</sup>, Sergey Gladkovsky<sup>2, b</sup>, Sergey Lepikhin<sup>2, c</sup>, Ivan Kamantsev<sup>2, d</sup>, Alexey Lunev<sup>1, e</sup>, Marina Perovskaya<sup>1, f</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Yekaterinburg, 630049, Russian Federation

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-9457-4309>,  [litsin@ispms.tsc.ru](mailto:litsin@ispms.tsc.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-3542-6242>,  [gsv@imach.uran.ru](mailto:gsv@imach.uran.ru),  
<sup>c</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-0240-2164>,  [lsv@imach.uran.ru](mailto:lsv@imach.uran.ru), <sup>d</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-0775-4043>,  [ks@imach.uran.ru](mailto:ks@imach.uran.ru),  
<sup>e</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-0777-5357>,  [agl@ispms.tsc.ru](mailto:agl@ispms.tsc.ru), <sup>f</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-2780-6023>,  [mv\\_perovskaya@inbox.ru](mailto:mv_perovskaya@inbox.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 17 March 2018

Revised: 27 March 2018

Accepted: 09 April 2018

Available online: 15 June 2018

##### Keywords:

Welding

Surfacing

Fracture

Impact strength

Fracture toughness

Energy parameters

Arc

Welded joints

##### Acknowledgements:

The authors are grateful to the staff of the IMASH UrB RAS *Veselova V.E.* for the performed fractographic studies and *Kuteneva S.V.* for the quantitative metallographic analysis of welds with the use of equipment of OJSC "Uralturbo" (Ekaterinburg). The results of the research presented in the paper were obtained using the equipment of the CUC "Plastometry" of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences.

##### Funding:

The research is executed with financial support of RSF, the project No. 16-19-10010.

#### ABSTRACT

**Justification:** High-strength low-alloy steels are used in mechanical engineering, construction industry, shipbuilding, pipeline transport among others due to increased requirements for the performance characteristics of welded structures. The main method used in the construction of metal structures is arc welding, which has a significant impact on the properties of the weld zone, its structure and mechanical properties. At the same time, there is always a risk of various defects in the weld zone, which physical origin is diverse and difficult to predict. **The purpose of the research** is to find ways to improve performance of the high-duty structures by estimating the influence of energy parameters of the covered-electrode welding modes and the change of its control algorithms on the weld structure and the heat-affected zone, as well as the characteristics of the impact toughness and crack resistance of the resulting welded joints. **Experiment technique:** steel 09G2S specimen, obtained by electrode welding in the modes of direct current (DC) and low-frequency current modulation (LFM) are used to carry out tests. Optical microscopy combined with image analyzer is used to study the structure of welds, the heat-affected zone (HAZ) and the base metal (BM). As a part of the study the average grain size is determined. An analysis of fractures of different sections is carried out using scanning electron microscopy. **Results:** the assessment of the impact of the energy parameters of the covered-electrode welding modes on the characteristics of the impact toughness and crack resistance of welds, as the main indicators of the operational characteristics of the high-duty structures is taken. The dependence of the energy parameters of covered-electrode welding modes and the change of its control algorithms on the structure of the weld and heat affected zone is established. It is shown that the pulsed nature of changes in the energy parameters of the welding mode has a favorable effect on the heat capacity of the melt of the molten pool and the conditions of its crystallization. Testing of HAZ in static fracture toughness showed that all investigated compounds have high values in the whole temperature range: from +20 °C to -60 °C, even in the presence of defects such as fatigue cracks. **The effective influence** of welding performed in the low-frequency current modulation mode, as compared to DC welding, on the resistance to brittle fracture of welded joints made of low-carbon steels at low climatic temperatures is determined.

**For citation:** Gladkovsky S.V., Lepikhin S.V., Kamantsev I.S., Lunev A.G., Perovskaya M.V. Investigation of the influence of energy parameter of the covered-electrode welding on the impact strength characteristics and cracking resistance of the welded joints obtained. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 100–115. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-100-115. (In Russian).

**\* Corresponding author**

Saraev Yury N., D.Sc. (Engineering), Chief Researcher  
Institute of Strength Physics and Materials Science  
of the Siberian Branch of the RAS,  
2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation  
Tel.: +7 (3222) 492-942, e-mail: litsin@ispms.ru

## References

1. Pokhodnya I.K., ed. *Fiziko-tekhnicheskie problemy sovremennogo materialovedeniya*. V 2 t. T. 1 [Physical and technical problems of modern materials science. In 2 vol. Vol. 1]. National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev, Akademperiodika Publ., 2013. 583 p. ISBN 978-966-360-236-3.
2. Liu C., Bhole S.D. Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, vol. 18, iss. 2, pp. 169–181. doi: 10.1179/1362171812Y.0000000090.
3. Shiga C. Problems in welded joints and systematic approach to their solution in STX21 project. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2000, vol. 5, iss. 6, pp. 356–364.
4. Zenitani S., Hayakawa N., Yamamoto J., Hiraoka K., Morikage Y., Kubo T., Yasuda K., Amano T. Development of new Low Transformation-Temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds. *Proceedings of 2002 Symposium for Welded Structures of the Japan Welding Society*, Osaka, 2002, pp. 346–353.
5. Ogino Y., Hirata Y. Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW. *Welding in the World*, 2015, vol. 59, iss. 4, pp. 465–473. doi: 10.1007/s40194-015-0221-8.
6. Kannengiesser Th., Lausch Th., Kromm A. Effects of heat control on the stress build-up during high-strength steel welding under defined restraint conditions. *Welding in the World*, 2011, vol. 55, iss. 7, pp. 58–65.
7. Saraev Yu.N., Gladkovsky S.V., Golikov N.I. et al. Poiskovyie issledovaniya povysheniya nadezhnosti metallokonstruktsii otvetstvennogo naznacheniya, rabotayushchikh v usloviyakh ekstremal'nykh nagruzok i nizkikh klimaticheskikh temperatur [Research of improving the reliability of metal of responsible purpose, working in conditions of extreme loads and low climatic temperatures]. *Naukoemkie tekhnologii v proektakh RNF. Sibir'* [Knowledge-based technology in the draft RSF. Siberia]. Ed. by S.G. Psakh'e and Yu.P. Sharkeev. Tomsk, NTL Publ., 2017, pp. 134–202. ISBN 978-5-89503-607-5.
8. Loos A.V., Lukutin A.V., Saraev Yu.N. *Istochniki pitaniya dlya impul'snykh elektrotekhnologicheskikh protsessov* [Power supplies for pulse electro-technological processes]. Tomsk, TPU Publ., 1998. 159 p.
9. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Selivanov Yu.V. Special features of the formation of protective corrosion-resisting coatings in pulsed electric arc surfacing of austenitic steels. *Welding International*, 2010, vol. 24, iss. 11, pp. 884–888. doi: 10.1080/09507116.2010.486199.
10. Saraev Yu.N., Lunev A.G., Kiselev A.S., Gardiner A.S., Nesteruk D.A., Khaydarova A.A., Chinakhov D.A., Semenchuk V.M. Issledovanie vliyaniya energeticheskikh parametrov rezhima dugovoi svarki pokrytymi elektrodami na stabil'nost' teplomassoperenosa [Investigation of the influence energy parameters of the arc welding mode with coated electrodes for the stability of heat and mass transfer]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2018, no. 2, pp. 3–13.
11. Saraev Yu.N., Chinakhov D.A., Ilyshenko D.I., Kiselev A.S., Gordynets A.S. Investigation of stability of melting and electrode metal transfer in consumable electrode arc welding using power sources with different dynamic characteristics. *Welding International*, 2017, vol. 31, iss. 10, pp. 784–790. doi: 10.1080/09507116.2017.1343977.
12. Traidia A., Roger F., Guyot E., Schroeder J., Lubineau G. Hibrid 2D–3D modelling of GTA welding with filler wire addition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, pp. 3946–3963. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.025.
13. Wang H., Colegrove P.A., Mehnen J. Hybrid modelling of the contact gap conductance heat transfer in welding process. *Advances in Engineering Software*, 2014, vol. 68, pp. 19–24. doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.11.000.
14. Tong L.G., Gu J.C., Yin S.W., Wang L., Bai S.W. Impacts of torch moving on phase change and fluid flow in weld pool of SMAW. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 100, pp. 949–957.
15. Pokhodnya I.K., Suptel' A.M. Teplosoderzhanie kapel' pri svarke v uglekislom gaze [Enthalpy drops during welding in carbon dioxide]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 1970, no. 7, pp. 12–17.

16. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Poletika I.M., Tyutev A.V., Nikonova I.V., Kirilova N.V., Sevastianov S.P. Improvement of the structure and properties of welded joints in large-diameter oil and gas pipes. *Avtomaticheskaya svarka = The Paton Welding Journal*, 2004, no. 12, pp. 34–38. (In Russian).

17. Saraev Yu.N. Obosnovanie kontseptsii povysheniya bezopasnosti i zhivuchesti tekhnicheskikh sistem, ekspluatiruemyykh v regionakh Sibiri i Krainego Severa, na osnove primeneniya adaptivnykh impul'snykh tekhnologii svarki [Substantiation of a concept to improve safety and durability of engineering systems operating in siberia and the extreme north, based on the use of adaptive impulsive welding technologies]. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2010, no. 8, pp. 14–19.

18. Lankin Yu.N. Indicators of stability of the GMAW process. *Avtomaticheskaya svarka = The Paton Welding Journal*, 2011, no. 1, pp. 7–15. (In Russian).

19. Karkhin V.A. *Teplovyie protsessy pri svarke* [Thermal processes in welding]. 2<sup>nd</sup> ed., rev. St. Petersburg, Polytechnic Institute Publ., 2015. 572 p. ISBN 978-5-7422-4629-9.

20. Rykalin N.N. *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* [Calculations of thermal processes in welding]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 296 p.

21. Vornovitsky I.N., Gorbatov S.A., Glushkov Yu.A., Ktitorov R.B. Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva elektrodov UONI-13/55 [Improvement of the technology of production of electrodes UONI-13/55]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2001, no. 1, pp. 42–44.

22. Broek D. *Elementary engineering fracture mechanics*. Leyden, Noordhoff, 1974 (Russ. ed.: Broek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 368 p.).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).