

Абашкин Е.Е., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Механические свойства материала, наплавляемого на пластину из стали с высоким углеродным эквивалентом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 15–24. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.02

Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N. The mechanical properties of the material deposited on a plate of steel with high carbon equivalent. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 15–24. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.02

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 1, 2020**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.02  
УДК 621.791: 620.17

**Е.Е. Абашкин, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров**

Хабаровский федеральный научно-исследовательский центр ДВО РАН,  
Комсомольск-на-Амуре, Россия

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА, НАПЛАВЛЯЕМОГО НА ПЛАСТИНУ  
ИЗ СТАЛИ С ВЫСОКИМ УГЛЕРОДНЫМ ЭКВИВАЛЕНТОМ**

Разработка и применение ресурсосберегающих технологий, направленных на получение металлоизделий и конструкций с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками, позволяет предприятиям получить ряд конкурентных преимуществ. Достижению таких преимуществ в немалой степени способствует возможность расширения номенклатуры применяемых металлов и сплавов, а также возврат материалов в технологический цикл. На реализацию этих задач направлено использование разрабатываемой в ИМиМ ДВО РАН технологии получения прочного материала, наплавляемого на элементы конструкций, выполненные из сталей с высоким углеродным эквивалентом. Прочностные характеристики таких сталей, как правило, значительно превосходят характеристики материалов, широко применяемых для сварки и наплавки, но их использование ограничено дополнительными технологическими требованиями. Так, например, для наплавки на сталь 45 требуется использование дугового процесса с подогревом и последующей термообработкой. Кроме того, ввиду склонности этой стали к образованию трещин и пор в зоне термического влияния ее традиционное использование ограничивается слабонагруженными конструкциями.

Суть разрабатываемого процесса заключается в совмещении воздействий электрической дуги и алюмотермического процесса на стальную поверхность. Реализация технического решения осуществляется за счет использования на агрегате автоматической дуговой сварки под слоем флюса электрода, выполненного в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем. Наполнитель представляет собой смесь восстановителя и окислителя, являющейся отходом машиностроения. Совмещенный процесс создает условия для внесения дополнительного тепла экзотермической реакции, а также позволяет улучшить теплоизоляцию зоны наплавки за счет формирующегося шлака. Возможность использования потенциала углеродистых сталей для получения прочного неразъемного соединения определяет актуальность исследований, проводимых в этом направлении. Рассмотрено влияние теплового режима на формирование прочностных характеристик материала, наплавляемого на пластину из стали 45.

**Ключевые слова:** сталь 45, автоматическая дуговая сварка под слоем флюса, порошковая проволока, алюмотермитный наполнитель, зона термического влияния, механическая прочность, фрактограмма вязкого излома, деформация, алюмотермитный шлак, ресурсосберегающая технология.

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

Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of RAS,  
Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

**THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL DEPOSITED  
ON A PLATE OF STEEL WITH HIGH CARBON EQUIVALENT**

The development and application of resource-saving technologies aimed at obtaining metal products and structures with high strength and operational characteristics allows enterprises to obtain a number of competitive advantages. The achievement of such advantages, to a large extent, is facilitated by the possibility of expanding the range of metals and alloys used, as well as the return of materials to the technological cycle. The implementation of these tasks is aimed at using the technology developed at the IMiM FEB RAS for producing durable material deposited on structural elements made of steels with a high carbon equivalent. The strength characteristics of such steels, as a rule, are significantly superior to materials widely used for welding and surfacing, but their use is limited by additional technological requirements. So, for example, for surfacing on steel 45, the use of an arc process with heating and subsequent heat treatment is required. In addition, due to the tendency of this steel to form cracks and pores in the heat affected zone, its traditional use is limited to lightly loaded structures.

The essence of the process being developed is to combine the effects of an electric arc and an aluminothermic process on a steel surface. The technical solution is implemented through the use of an automatic arc welding machine under the flux layer of the electrode, made in the form of a flux-cored wire with aluminothermic filler. The filler is a mixture of reducing agent and scale, which is a waste of mechanical engineering. The

combined process creates the conditions for introducing additional heat of the exothermic reaction, and also allows to improve the thermal insulation of the deposition zone due to the forming slag. The possibility of using the potential of carbon steels to obtain a strong permanent connection determines the relevance of research in this direction. The influence of the thermal regime on the formation of the strength characteristics of the material deposited on a plate of steel 45 is considered.

**Keywords:** steel 45, automatic submerged arc welding, cored wire, aluminothermic filler, heat-affected zone, mechanical strength, viscous fracture fractogram, deformation, aluminothermic slag, resource-saving technology.

## Введение

В промышленном производстве востребованность стальных конструкций, включающих неразъемные соединения, которые предназначены для эксплуатации в условиях динамических воздействий, сопровождаемых значительными знакопеременными нагрузками, во многом определяется характеристиками используемых материалов и технологий таких узлов. Жесткость неразъемного узла обеспечивается, как правило, в ходе наплавки электродного металла на матричный. Стабильных условий процесса формирования металла на всем протяжении наплавки добиваются автоматической сваркой под слоем флюса [1]. Однако использование современных средств наплавки электродного материала позволяет приблизить его свойства к свойствам металла основы лишь при использовании дополнительных операций термообработки, что ведет к повышению трудоемкости и затратам материалов [2].

Традиционный процесс получения наплавки при использовании агрегатов автоматической сварки под слоем флюса предусматривает использование электрода в виде проволоки сплошного сечения для получения соединений из сталей неотвеченного назначения [3, 4] или порошковой проволоки для получения наплавки на элемент, выполненный из конструкционной стали [5, 6]. В обоих случаях энергия электродугового процесса расходуется на нагрев электродного материала и зоны наплавки. Теплоотвод от участка стыка соединяемых элементов определяет условия формирования структуры и свойств наплавляемого металла, а также зоны термического влияния [7]. Добиться структуры шва без пор и с удовлетворительной прочностью удастся при прогреве кромок соединяемых элементов, а также значительном количестве «проходов» электрода.

В настоящее время применяют технологии, в которых с целью минимизации затрат и получения удовлетворительных прочностных характеристик неразъемного соединения из стали обыкновенного качества используют электрод в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем [8]. При таком процессе наплавки металла на кромку стального изделия осуществляется при помощи стержня-электрода, представляющего собой протяженную оболочку, заполненную термитным наполнителем по принципу порошковой проволоки [9].

В основе процесса лежит экзотермическая окислительно-восстановительная реакция, в ходе которой железо восстанавливается из окалины с получением термитной стали [10]. Шихта для получения термитной стали представляет собой смесь порошка алюминия, окалины и наполнителей. Процесс позволяет обеспечить возврат сложноутилизируемых отходов предприятий машиностроения и металлургии, составляющих основу шихты, которой заполнен электрод. Разогрев наплавляемого металла на стальную деталь в таком процессе обеспечивается в результате тепла от электродугового и алюмотермитного воздействий [11, 12]. Предварительными теоретическими [13] исследованиями установлено влияние зоны локального нагрева участка соединения наплавляемого металла и пластины из Ст3сп на картину ее деформации. При этом определена неприемлемо низкая степень достоверности расчета прочностных характеристик наплавляемого металла и деформации сварной конструкции, произошедшей в результате совместного электродугового и алюмотермитного воздействия. При практическом осуществлении наплавки металла от электрода в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем удалось добиться соответствия химического состава наплавляемого металла и зоны термического влияния материалу основы, выполненной из Ст3сп, соответствующей ГОСТ 380–2005. Определены параметры теплового воздействия на участок соединения наплавляемого металла с основой, при которых оно соответствует требуемым прочностным и размерно-геометрическим характеристикам. Таким образом, алюмотермитный материал, заполняющий оболочку электрода, обеспечивает регулирование температуры и поставку металла в зону наплавки. Алюмотермитный шлак, в свою очередь, обеспечивает замедление отведения тепла от зоны стыка [14–16], что позволяет сократить негативное влияние локального перегрева зоны соединения.

Значительно сложнее получить сварное неразъемное соединение деталей, выполненных из конструкционных углеродистых сталей, уникальными прочностными и эксплуатационными свойствами которых приходится пренебречь [17]. К числу причин отказа от использования этих сталей в сварке относят трудоемкость, ввиду склонности материала стыка к образованию пор и трещин. Сталь с высоким углеродным эквивалентом для получения сварных конст-

рукций используют редко, а влияние локального нагрева на структуру и физико-механические свойства материала, наплаваемого на изделия из таких сталей, изучены недостаточно. Таким образом, актуальным представляется разработка и применение ресурсосберегающих технологий, направленных на получение металлоизделий и конструкций с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками, позволяющими расширить номенклатуру применяемых металлов и сплавов, а также возврат материалов в технологических цикл.

### Цели и задачи

Цель – определение режима совмещенного теплового алюмотермического и электродугового воздействия на материал пластины из стали с высоким углеродным эквивалентом для получения наплавки с повышенными механическими характеристиками.

Для достижения цели в работе решались следующие задачи:

- в результате использования энергий алюмотермитной реакции и электрической дуги наплавление электродного материала на кромки пластин, выполненных из углеродистой стали;
- определение механических свойств наплаваемого экспериментальным электродом материала и их сравнение с результатами, полученными при использовании традиционного электрода в виде проволоки сплошного сечения.

### Методы решения задач и материалы

Для эксперимента использовали пластины, выполненные из конструкционной углеродистой стали 45, отвечающей требованиям ГОСТ 1050–2013. Разделка пластин толщиной  $S = 12$  мм, шириной 150 мм и длиной 500 мм осуществлена по типу С21 согласно ГОСТ 8713–79.

Формирование наплаваемого материала осуществляли на агрегате автоматической сварки АДФ-1000-5Е под слоем флюса АН-348 порошковой проволокой [9], сердечник которой состоит из алюмотермитной шихты. В состав шихты входят компоненты фракции 0,1–0,315 мм: оксид железа, восстановитель, наполнители. Фракция компонентов алюмотермитной шихты получена рассевом на ситах модели 026, выполненных по ГОСТ 29234.3–91. В качестве оксида использована железная окалина со следующим химическим составом: С = 0,150 %; Мп = 1,188 %; Si = 2,960 %; S = 0,030 %; P = 0,030 %; Fe = 71,500 %; Al = 0,697 %; Ni = 0,188 %; Cr = 0,173 %; Cu = 0,444 %; O<sub>2</sub> = 22,639 %. В качестве восстановителя использован алюминий марки ПА-2, соответствующий ГОСТ 6058–73. В качестве наполни-

телей шихты использованы: ферромарганец ФМн-78 (А), соответствующий ГОСТ 4755–91; ферросилиций ФС50, соответствующий ГОСТ 1415–93; графит ЭГ15, выполненный по ТУ 14-139-177–2003.

С целью повышения однородности компонентов по фракции шихту подвергали обработке в шаровой мельнице периодического действия типа МШП-700 в течение 10 мин. После обработки алюмотермитную шихту упаковывали в проволочный электрод на агрегате НИИМОНТАЖ типа МТР1201УХЛ4. Для оболочки электрода использовали ленту марки 08кп-ОМ-2–1×100, соответствующую ГОСТ 503–81. Диаметр электрода после упаковки  $\varnothing = 2,8$  мм с коэффициентом заполнения  $K_3 = 0,37$ .

Наплавку электродного материала на кромки пластин осуществляли за два прохода согласно режимам теплового воздействия, представленным в табл. 1. Значения силы тока  $I_i$ , напряжения  $U_i$ , скорости перемещения электрода  $V_i$  и эффективной тепловой мощности дуги  $q_i$  [18] для каждого режима эксперимента постоянные.

Таблица 1

Характеристики режимов формирования металла, наплаваемого от электрода на кромки соединяемых стальных пластин

Режим эксперимента	$I_i$ , А	$U_i$ , В	$V_i$ , м/ч	$\eta$	* $q_i$ , ккал/с
1**	300	35	20	0,99	2,49
2	250	35	20	0,9	1,89
3	300	35	20	0,9	2,27
4	350	35	20	0,9	2,65

Примечание:  $i$  – порядковый номер режима;

\* при расчете  $q$  для случаев применения режимов 2, 3 и 4 наплавки материала электрода в виде порошковой проволоки с термитным наполнителем использовали значение  $\eta = 0,9$ ;

\*\* режим 1 (традиционный процесс автоматической наплавки под флюсом с проволокой сплошного сечения марки Св-08А) является свидетелем режима 3, для которого при расчете  $q$  использовано значение  $\eta = 0,99$ .

Эффективную тепловую мощность, позволяющую учесть технологические условия расплавления металла в стыковой зоне, рассчитывали по формуле

$$q_i = 0,24U_iI_i\eta_i,$$

где 0,24 – коэффициент перевода электрических величин в тепловые, ккал/Вт·с;  $\eta$  – эффективный коэффициент полезного действия (КПД) нагрева [1],  $\eta \approx 0,9 \div 0,99$ . На величину  $\eta$  влияет удельная плотность электрода, определяемая коэффициентом его заполнения  $K_3$ , который находится в диапазоне  $0,15 < K_3 \leq 0,4$  [11, 19]. Значение  $\eta$  тем больше, чем

больше металла поступает в ванну с электродом. Использование электрода в виде порошковой проволоки обеспечивает значение эффективного КПД до  $\eta = 0,9$ .

При исследовании механических свойств наплаваемого металла определяли предел прочности на разрыв  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_T$ , относительное удлинение  $\delta$  согласно ГОСТ 6996–66 (образцы изготавливали с учетом ГОСТ 1497–84), ударную вязкость КСЧ, твердость ЗТВ по шкале HRA, пластическую деформацию при изгибе. 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. Определение величины ударной вязкости проводили в соответствии с ГОСТ 9454–78. Форма и размеры образцов для испытания соответствовали концентратору вида  $U$  с радиусом  $R = 1 \pm 0,07$  мм, регламентированным ГОСТ 9454–78. Ударную вязкость определяли маятниковым копром типа МК с исполнением согласно ГОСТ 10708–82. Твердость образцов измеряли по 10 точкам в направлении от центра шва к периферии методом Роквелла. Поверхность образцов для определения твердости подготавливали согласно ГОСТ 9013–59. По полученным результатам выведены средние значения твердости шва и на протяжении ЗТВ. Способность материалов экспериментальных соединений выдерживать пластическую деформацию при изгибе определяли на тестовой машине AG-X plus SHIMADZU, снабженной устройством, отвечающим требованиям ГОСТ 28840–90. Испытание на трехточечный изгиб проводили согласно требованиям ГОСТ 14019–2003.

Для образцов, имеющих удовлетворительные прочностные характеристики, химический состав определяли согласно ГОСТ 18895–97 при помощи приставки элементного анализа типа OXFORD Xmax. Изображение макроструктур в виде фрактограмм получено при помощи растрового электронного микроскопа S-3400N HITACHI при  $\times 100$ .

### Основное содержание работы

В результате совмещенного алюмотермитного и электродугового теплового воздействия путем использования порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем получены неразъемные соединения пластин из стали 45 с минимальными значениями деформации неразъемного соединения [20].

Оценка прочности наплаваемого материала на пластины из стали 45 проводилась сопоставлением со значениями прочности неразъемных со-

единений [21]. При оценке прочности соединения деталей из стали марки Ст45, выполняемого автоматической сваркой, применяется понижающий коэффициент, составляющий 0,9 от прочности основного металла. Следовательно, удовлетворительной можно признать прочность наплаваемого металла, значения которой соответствуют  $\sigma_b = 549 \div 630$  МПа и  $\sigma_T = 319$  МПа.

В ходе серии постановочных экспериментов выявлено, что прочность металла, однократно наплаваемого на пластину из стали 45 (без подготовки сварочных материалов и последующей термообработки) проволокой сплошного сечения на АДФ, не превышает  $\sigma_b = 490$  МПа. При аналогичных условиях прочность наплавки, полученной экспериментальным электродом, составляет  $\sigma_b = 621$  МПа. Повторное тепловое воздействие производит отпуск, что положительно сказывается на улучшении физико-механических свойств при сварке [22, 23]. В этой связи для проведения корректного сравнительного анализа традиционной и экспериментальной технологий наплавку металла на стальную пластину было решено получать за два прохода. Механические свойства наплавленного металла, полученного при различных режимах теплового воздействия, представлены на рис. 1–4.

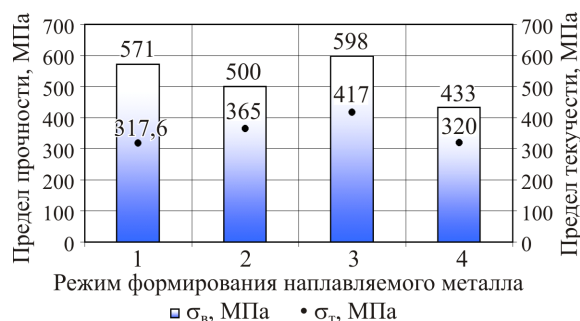


Рис. 1. Зависимость пределов прочности и текучести при растяжении образцов металла, наплавленного на пластины из стали 45, от режимов формирования

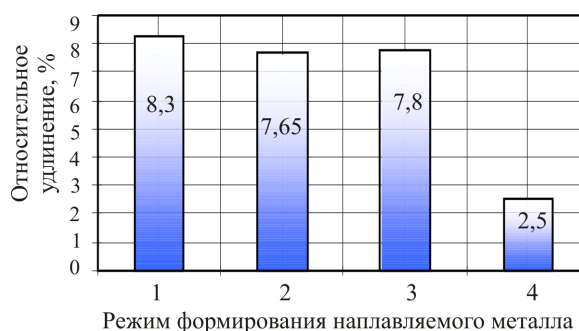


Рис. 2. Влияние режима формирования наплаваемого металла на величину относительного удлинения образцов при испытании на разрыв

В ходе анализа экспериментальных результатов, представленных на рис. 1, установлено, что временное сопротивление на разрыв металла, наплавленного при режимах 2 и 4, не отвечает требованиям, регламентированным ГОСТ 1050–2013, к стали 45 с понижающим коэффициентом 0,9 для сварных соединений. Однако значение предела текучести для образцов, полученных на этих режимах, в целом удовлетворяет требованиям ГОСТ 1050–2013. Так, при использовании режима 2, характеризующегося тепловой мощностью  $q_2 = 1,89$  ккал/с, значение предела текучести наплавленного металла  $\sigma_{T2} = 365$  МПа, что на 12 % выше значений, регламентированных ГОСТом для стали 45. Значение относительного удлинения для такого металла (см. рис. 2)  $\delta_2 = 7,65$  % при значении ударной вязкости (см. рис. 4)  $KCU_2 = 109,2$  кДж/см<sup>2</sup>. По причине недостатка тепловой мощности требуемый прогрев расплавленного металла не достигается, что определяет динамику скорости кристаллизации наплавленного металла и приводит к снижению значения предела прочности на 9 %, в сравнении с прочностью образца, полученного при режиме 1. Твердость наплавленного при режиме 2 металла  $HRA_2 = 45$ .

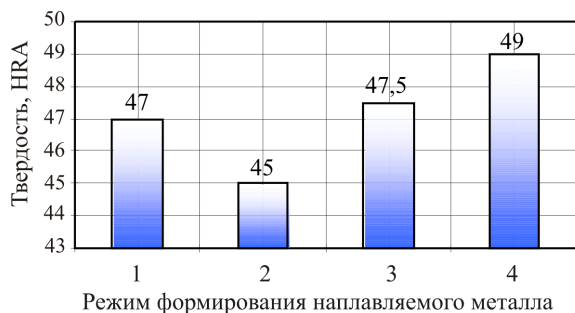


Рис. 3. Влияние режима формирования наплавленного металла на среднее значение твердости HRA в центре шва

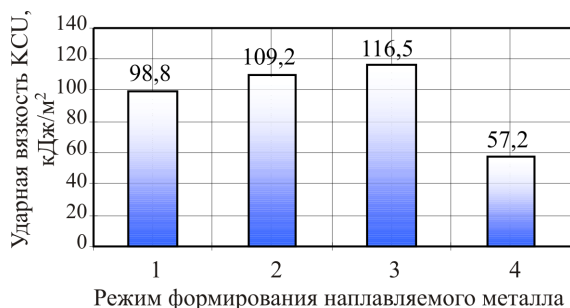


Рис. 4. Влияние режима формирования наплавленного металла на ударную вязкость KCU

Повышение силы тока до  $I = 350$  А (режим 4) приводит к увеличению тепловой мощности до значения  $q_4 = 2,65$  ккал/с. При этом наблюдается

резкое снижение ряда механических характеристик. Так, для образцов, полученных при тепловом воздействии, которое соответствует режиму 4, характерны следующие значения:  $\sigma_{B4} = 433$  МПа;  $\sigma_{T4} = 320$  МПа;  $\delta_4 = 2,5$  %;  $HRA_4 = 49$ ;  $KCU_4 = 57,2$  кДж/см<sup>2</sup>. Преимущественно негативное влияние оказывает, по всей видимости, значительный локальный перегрев зоны соединения и насыщение углеродом наплавленного металла, приводящее к увеличению его хрупкости.

Таким образом, получение достаточной эксплуатационной прочности металла, наплавленного на кромку пластины из стали 45 при режимах теплового воздействия 2 и 4, не представляется возможным.

Применение режима 3 с показателем тепловой мощности  $q_3 = 2,27$  ккал/с позволило получить образцы наплавленного металла с лучшими физико-механическими свойствами в серии экспериментов. При таком режиме металл, наплавленный электродом с алюмотермитным наполнителем за два прохода, соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 1050–2013, с учетом понижающего коэффициента 0,9 для неразъемного соединения пластин из стали 45.

Применение режима 3, при использованных в эксперименте диаметре электрода и толщине пластины, позволяет добиться значений прочностных характеристик наплавленного металла, превышающих значения предела текучести основного металла на 14 % и составляющих значения  $\sigma_{T4} = 417$  МПа. При этом значение  $\sigma_{B5} = 598$  МПа сопоставимо с нижним значением предела прочности на разрыв материала пластины из стали 45 ( $\sigma_{Cr45} = 610 \div 750$  МПа). Относительное удлинение наплавленного при таком режиме металла  $\delta_4 = 7,8$  %, а ударная вязкость  $KCU_5 = 116,2$  кДж/см<sup>2</sup>.

Установлено, что твердость образцов HRA неразъемных соединений из стали 45 по мере удаления от центра наплавленного металла к периферии увеличивается с 47,5 до 56 ед. на протяжении длины зоны термического влияния, составляющей 19 мм.

Склонность к самозакаливанию и образованию горячих трещин материала, наплавленного на сталь с высоким углеродным эквивалентом, определяет необходимость проведения механических испытаний на трехточечный изгиб. Внешний вид образца и дефекты представлены на рис. 5. В ходе такого испытания определялась способность неразъемного соединения принимать заданный по размеру и форме изгиб, характеризующийся углом, при котором в растянутой зоне образца появляется трещина, развивающаяся в процессе испытания. Важным является регистрация места появления

трещины или разрушения (по наплавляемому металлу, металлу околосшовной зоны или основному металлу). Установлено, что образцы, полученные на режимах 1, 2 и 3, соответствуют предъявляемым требованиям – угол изгиба  $140^\circ$  достигается без разрастания и образования трещин. В ходе испытания на трехточечный изгиб образцов, полученных на режиме 4, при достижении угла изгиба  $124^\circ$  происходит

образование трещин в зоне металла наплавки и в зоне сплавления с основным металлом.

Определение роли геометрии структур в разрушении материала [24, 25] возможно осуществить в ходе визуальной оценки характера разрушения образцов наплавляемого металла при помощи фрактограмм с поверхностей мест разрывов, представленных на рис. 6.

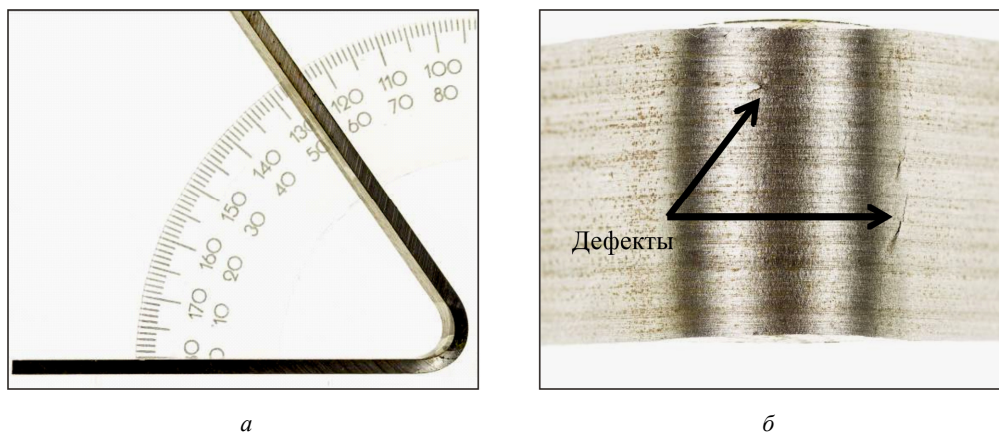


Рис. 5. Испытание на трехточечный изгиб: *а* – внешний вид образца; *б* – трещины в зоне наплавляемого металла дефектного образца

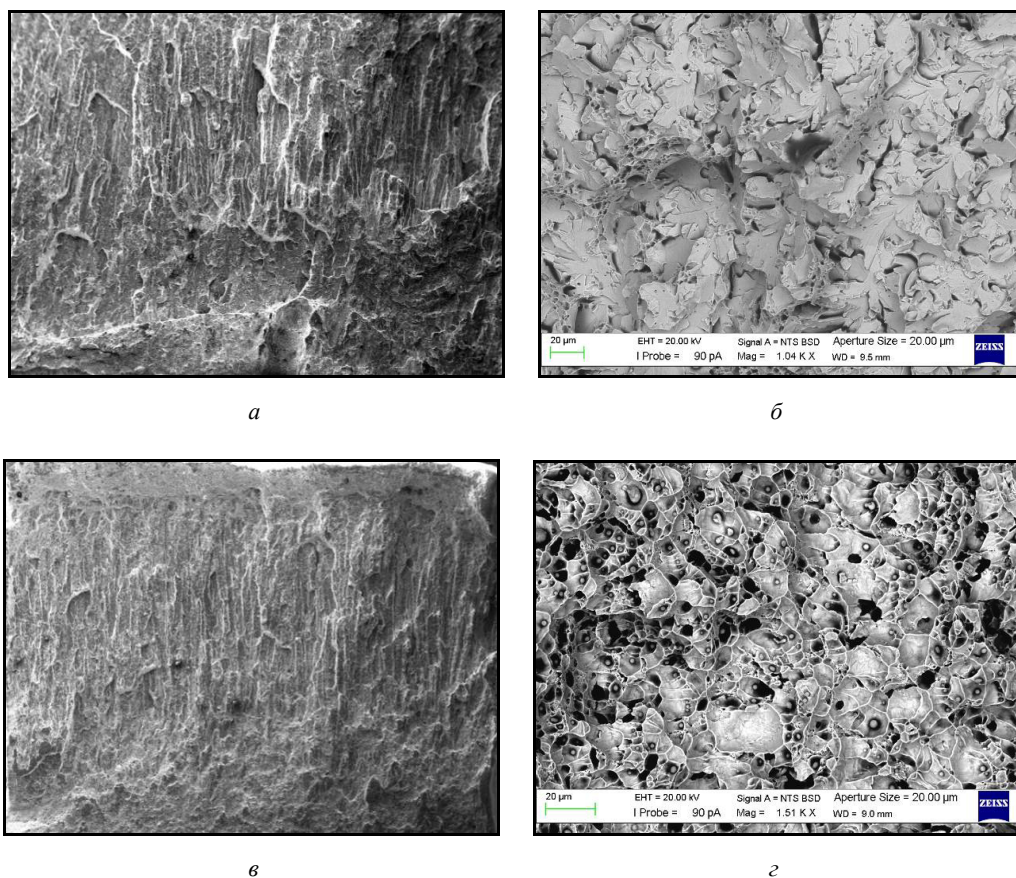


Рис. 6. Фрактограммы участков разрыва образцов металла наплавки ( $\times 100$  – слева,  $\times 1000$  – справа), полученных по различным режимам: *а, б* – режим 1; *в, г* – режим 3

Таблица 2

Сравнение химического состава матричного металла с химическим составом металла, наплавляемого на пластины из стали 45 при различных режимах теплового воздействия

Сталь 45		Содержание, мас. %						
		C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
		0,42–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,25
Режим	1	0,29	0,3	0,63	0,24	0,039	0,033	0,25
	2	0,21	0,20	0,53	0,20	0,032	0,029	0,18
	3	0,32	0,20	0,7	0,26	0,031	0,030	0,25
	4	0,4	0,4	0,59	0,1	0,033	0,030	0,14

Анализ фрактограмм показывает, что структура разрушения металла, полученного наплавлением с проволокой сплошного сечения (см. рис. 6, а, б), на 20 % представлена волокнистым изломом, а на 80 % – кристаллическим. Излом металла, наплавленного на кромку пластины из стали 45 с использованием режима 3 (см. рис. 6, в, г), характеризуется смешанной структурой разрушения, 60 % площади которой представлено волокнистым изломом, а 40 % – кристаллическим. Таким образом, наплавка металла электродом в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем по режиму 3 обеспечивает вязкий излом [26]. Для разрушения такого образца необходимо затратить более значительную энергию, скорость распространения трещины в таком материале невысока, что благоприятно сказывается на характеристиках материала наплавки.

Компоненты алюмотермитного наполнителя в совокупности с режимом комбинированного теплового воздействия определяют химический состав и структуру зоны термического влияния получаемого неразъемного соединения из наплавляемого металла и стали 45. Химический состав металла в зоне наплавления, полученного по режимам 1–4, представлен в табл. 2.

Как видно из данных, представленных в табл. 2, химический состав образцов наплавленного металла не в полной мере соответствует значениям диапазонов содержания основных элементов, характерных для стали 45 по ГОСТ 1050–2013. Содержание углерода ниже диапазона значений матричного металла, что характерно для технологических процессов получения неразъемных соединений из сталей с высоким углеродным эквивалентом. Однако следует заметить, что содержание углерода в экспериментальном образце, полученном при режиме наплавки 3, выше, чем в образце, полученном наплавкой электродом в виде проволоки сплошного сечения (по режиму 1). Поскольку содержание остальных элементов в металле наплавки в целом удовлетворяет диапазону значений, характерному для стали 45, а прочностные свойства такого металла выше, чем у образца-свидетеля, полученного по режиму 1, использование электрода в виде по-

рошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем при режиме теплового воздействия 3 для получения неразъемных соединений сталей с высоким углеродным эквивалентом можно считать целесообразным.

### Заключение

Серией экспериментов установлено, что прочностные характеристики материала, наплавляемого электродом в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем, сопоставимы с характеристиками материала соединяемых пластин из стали 45 при значении тепловой мощности дуги  $q = 2,27$  ккал/с и скорости перемещения электрода  $V = 20$  м/ч. Такой режим совмещенного алюмотермитного и электродугового воздействия позволил за два прохода получить значения предела прочности на разрыв наплавленного металла  $\sigma_b = 598$  МПа и предела текучести  $\sigma_t = 417$  МПа. Относительное удлинение наплавляемого металла  $\delta = 7,8$  %, ударная вязкость  $KCU = 116,2$  кДж/см<sup>2</sup>. Твердость наплавленного металла  $HRA = 47,5$ .

Экспериментально определено, что характер разрушения образцов, полученных при режиме комбинированного теплового воздействия 3, – вязкий, содержание углерода ниже, чем в матричном металле, химический состав по таким элементам, как Si, Mn, Ni, S, P и Cr, соответствует Ст45.

Таким образом, использование экспериментального электрода позволяет получать неразъемные соединения с элементами, выполненными из углеродистых сталей без их предварительного подогрева и последующей термообработки готового изделия.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.*

### Список литературы

1. Автоматическая сварка под слоем флюса элементов конструкций сверхбольшой толщины / Г.П. Карзов, С.Н. Галяткин, А.Я. Варовин, С.Г. Литвинов, Э.И. Михалева, В.И. Костылев, А.В. Воронов, Н.И. Степаненков, Н.В. Беляев // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 357–371.

2. Протокивиллов И.В., Порохонько В.Б. Управление формированием сварных соединений при ЭШС (обзор) // Автоматическая сварка. – 2012. – № 10 (714). – С. 54–59.
3. Шлепаков В.Н. Современные электродные материалы и способы электродуговой сварки плавлением (обзор) // Автоматическая сварка. – 2011. – № 10 (702). – С. 31–35.
4. Влияние легирующих элементов на формирование свойств сварочной омедненной проволоки для сварки высокопрочных низколегированных сталей / Н.В. Токарева, Н.В. Кошчева, Ю.Ю. Ефимова, А.Ю. Ломтева // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2018. – № 1 (46). – С. 50–52.
5. Штоколов С.А. Актуальность производства порошковых проволок в России // Сталь. – 2017. – № 1. – С. 50–51.
6. Исследование влияния состава шихты порошковой проволоки для подводной сварки на параметры наплавленного валика / А.О. Воропаев, А.И. Куракин, М.В. Воропаева, В.В. Мурзин // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 1–4 (38). – С. 11–15.
7. Исследование нарушения формы зоны термического влияния, вызванного отклонением от режимов электродуговой сварки, на прочность сварного соединения / Н.О. Ковалев, Л.З. Зайнагалина, Р.Р. Степанова, Д.И. Сидоркин, Л.В. Петрова // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 31–35.
8. Влияние теплового режима совместного электродугового и алюмотермического воздействия на формирование структуры и свойств наплавленного металла / Е.Е. Абашкин, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.В. Ткачева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 62–74.
9. Порошковая проволока: пат. 2675876 RU: МПК В23К35/368 / Абашкин Е.Е., Комаров О.Н., Жилин С.Г., Предеин В.В., Ткачева А.В., Панченко Г.Л. – Оpubл. 2018. – Бюл. № 36.
10. Новохацкий В.А., Жуков А.А., Макарычев Ю.И. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями. – М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.
11. 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.
12. 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 Дальневосточной shk.-сем., Комсомольск-на-Амуре, 11–15 сент. 2017 г. / под ред. А.И. Евстигнеева (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре, 2017. – С. 7–8.
13. Абашкин Е.Е., Каинг М., Ткачева А.В. Температурные напряжения пластины // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2016. – № 4 (30). – С. 24–33.
14. Фролов В.В., Винокуров В.Г., Волченко В.Н. Теоретические основы сварки. – М.: Высшая школа, 1970. – 392 с.
15. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
16. Полетаев Ю.В., Полетаев В.Ю. Однопроходная электродуговая сварка под тонким слоем шлака толстолистовых конструкций стали 09Г2С // Вестник Донского государственного технического университета. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 50–58.
17. Коберник Н.В., Третьяков Е.С., Чернышов Г.Г. Сварка неплавящимся электродом труб малого диаметра из углеродистых и низколегированных сталей с применением комбинированной защиты // Известия вузов. Машиностроение. – 2012. – № 9. – С. 70–76.
18. Каржаубаев А.С. Обобщенная методика определения основных геометрических параметров зоны наплавки // Известия вузов (Кыргызстан). – 2011. – № 6. – С. 39–41.
19. 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; АН УССР; Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. – Киев: Наукова думка, 1990. – 224 с.
20. Формирование температурных напряжений в пластине из углеродистой стали со сварным наплавом / А.В. Ткачева, Е.Е. Абашкин, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 12. – С. 99–104.
21. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. / под ред. А.И. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 2. – 462 с.
22. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов [и др.]; под ред. В.М. Нервного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.
23. Романов Ю.Г., Коновалов А.В. Оценка сопротивляемости сталей образованию холодных трещин при повторных нагревах в интервале температур отпуска // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – № 7. – С. 47–52.
24. Симонов М.Ю., Ханов А.М., Шайманов Г.С. Влияние структуры на параметры изломов и характеристики сопротивления росту трещин при ударном нагружении низкоуглеродистых конструкционных сталей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2011. – Т. 13, № 1. – С. 106–116.
25. Оценка строения изломов и структур в конструкционных сталях с использованием компьютеризированных процедур / А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, Х.Н. Ле, В.А. Траченко, С.В. Скородумов, К.Б. Папина, Х.Ч. Чинь // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 4 (34). – С. 44–52.
26. Герасимова Л.П. Изломы конструкционных сталей. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.

#### References

1. Karzov G.P., Galiatkin S.N., Varovin A.Ia., Litvinov S.G., Mikhaleva E.I., Kostylev V.I., Voronov A.V., Stepanenkov N.I., Beliaev N.V. Avtomaticheskaja svarka pod



sloem fiusa elementov konstruktсии sverkhbol'shoi tolshchiny [Automatic submerged-arc welding of extra-thick structural elements]. *Voprosy materialovedeniia*, 2009, no. 3 (59), pp. 357–371.

2. Protokovilov I.V., Porokhon'ko V.B. Upravlenie formirovaniem svarnykh soedinenii pri EShS (obzor) [Management of welded connections formation at ESPW (overview)]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 2012, no. 10 (714), pp. 54–59.

3. Shlepakov V.N. Sovremennye elektrodnye materialy i sposoby elektrodugovoi svarki plavlaniem (obzor) [Modern electrode materials and methods of electric arc fusion welding]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 2011, no. 10 (702), pp. 31–35.

4. Tokareva N.V., Koptseva N.V., Efimova Iu.Iu., Lomteva A.Iu. Vliianie legiruiushchikh elementov na formirovanie svoistv svarchnoi omednennoi provoloki dlia svarki vysokoprochnykh nizkolegirovannykh stali [Influence of alloying elements on formation of properties of copper-coated welding wire for welding of high-strength low-alloy steels]. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov*, 2018, no. 1 (46), pp. 50–52.

5. Shtokolov S.A. Aktual'nost' proizvodstva poroshkovykh provolok v Rossii [Relevance of cored wire production in Russia]. *Stal'*, 2017, no. 1, pp. 50–51.

6. Voropaev A.O., Kurakin A.I., Voropaeva M.V., Murzin V.V. Issledovanie vliianiia sostava shikhty poroshkovoi provoloki dlia podvodnoi svarki na parametry naplavlennogo valika [Investigation of the influence of the composition of the subsea weld powder pro-welding charge on the parameters of the molten roller]. *Morskii intellektual'nye tekhnologii*, 2017, no. 1–4 (38), pp. 11–15.

7. Kovalev N.O., Zainagalina L.Z., Stepanova R.R., Sidorkin D.I., Petrova L.V. Issledovanie narusheniia formy zony termicheskogo vliianiia, vyzvannogo otkloneniem ot rezhimov elektrodugovoi svarki, na prochnost' svarnogo soedineniia [Investigation of the shape disturbance of the thermal infusion zone caused by deviation from the modes of electric arc welding, on the strength of the welded joint]. *Uspekhi sovremennoi nauki*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 31–35.

8. Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N., Tkacheva A.V. Vliianie teplovogo rezhima sovmestnogo elektrodugovogo i aliumotermicheskogo vozdeistviia na formirovanie struktury i svoistv naplavliaemogo metalla [Influence of the thermal regime of joint electric arc and alumothermal influence on formation of structure and properties of the molten metal]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 62–74.

9. Abashkin E.E., Komarov O.N., Zhilin S.G., Predein V.V., Tkacheva A.V., Panchenko G.L. Poroshkovaia provoloka [Tubular wire]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no. 2675876 (2018).

10. Novokhatskii V.A., Zhukov A.A., Makarychev Iu.I. Malootkhodnaia tekhnologiiia proizvodstva stal'nykh otlivok s ekzotermicheskimi pribyliami [Low-waste technology for producing steel castings with exothermic profits]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 64 p.

11. Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N. Vliianie upakovki komponentov termitnogo napolnitelia poroshkovoi provoloki na protsessy elektrodugovogo pereplava [Influence of packing the termite filler components of the

cored wire on the electric arc remelting processes]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 1, no. 1 (33), pp. 96–104.

12. Abashkin E.E. Vliianie granulometricheskogo sostava komponentov smesi na zapolniaemost' svarchnoi poroshkovoi provoloki [Influence of particle size distribution of mixture components on welded cored wire fill rate]. *Fundamental'naia mekhanika v kachestve osnovy sovershenstvovaniia promyshlennykh tekhnologii, tekhnicheskikh ustroistv i konstruktсии: materialy II Dal'nevostochnoi shk.-sem.* Ed. A.I. Evstigneeva et al. – Komsomol'sk-na-Amure, 2017, pp. 7–8.

13. Abashkin E.E., Kaing M., Tkacheva A.V. Temperaturnye napriazheniia plastiny [Temperature stress plate]. *Vestnik ChGPU im. I.Ia. Iakovleva. Mekhanika predel'nogo sostoianiia*, 2016, no. 4 (30), pp. 24–33.

14. Frolov V.V., Vinokurov V.G., Volchenko V.N. Teoreticheskie osnovy svarki [Theoretical foundations of welding]. Moscow: Vysshaia shkola, 1970, 392 p.

15. Tekhnologiiia elektricheskoi svarki metallov i splavov plavlaniem [Technology of electric welding of metals and alloys by fusion]. Ed. B.E. Patona. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 768 p.

16. Poletaev Iu.V., Poletaev V.Iu. Odnoprokhodnaia elektrodugovaia svarka pod tonkim sloem shlaka tolstolistovyykh konstruktсии stali 09G2S [Single-pass electric arc welding under a thin layer of slag of plate structures of steel 09G2S]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 50–58.

17. Kobernik N.V., Tre'tiakov E.S., Chernyshov G.G. Svarka neplaviashchimsia elektrodom trub malogo diametra iz uglerodistykh i nizkolegirovannykh stali s primeneniem kombinirovannoi zashchity [Non-melting electrode welding of small diameter pipes made of carbon and low-alloy steels with combined protection]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 2012, no. 9, pp. 70–76.

18. Karzhaubaev A.S. Obobshchennaia metodika opredeleniia osnovnykh geometricheskikh parametrov zony naplavki [Generalized method for determination of the main geometrical parameters of the cladding zone]. *Izvestiia vuzov (Kyrgyzstan)*, 2011, no. 6, pp. 39–41.

19. Pokhodnia I.K., Gorpeniuk V.N., Milichenko S.S. et al. Metallurgiiia dugovoi svarki: Protssy v duge i plavlenie elektrodov [Arc welding metallurgy: Arc and electrode melting processes]. Ed. I.K. Pokhodni. AN USSR; In-t elektrosvarki im. E.O. Patona. Kiev: Naukova dumka, 1990, 224 p.

20. Tkacheva A.V., Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N. Formirovanie temperaturnykh napriazhenii v plastine iz uglerodistoi stali so svarnym naplavom [Formation of temperature stresses in carbon steel plate with welded cladding]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2019, no. 12, pp. 99–104.

21. Svarka v mashinostroenii: spravochnik: v 4 t. [Engineering Welding: Handbook]. Ed. A.I. Akulova. Moscow: Mashinostroenie, 1978, vol. 2, 462 p.

22. A.V. Konovalov et al. Teoriiia svarchnykh protsessov [Welding process theory]. Ed. V.M. Nerovnogo. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baubana, 2007, 752 p.

23. Romanov Iu.G., Konovalov A.V. Otsenka soprotivliaemosti stali obrazovaniuu kholodnykh treshchin pri povtornykh nagrevakh v intervale temperatur otpuska [Evaluation

of steel resistance to cold cracking at repeated heating in the tempering temperature range]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroyeniye*, 2011, no. 7, pp. 47–52.

24. Simonov M.Iu., Khanov A.M., Shaimanov G.S. Vliyanie struktury na parametry izlomov i kharakteristiki soprotivleniia rostu treshchin pri udarnom nagruzhении nizkouglerodistykh konstruksionnykh staley [Influence of structure on fracture parameters and characteristics of resistance to crack growth under impact loading of low-carbon structural steels]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye. Materialovedeniye*, 2011, vol. 13, no. 1, pp. 106–116.

25. Kudria A.V., Sokolovskaia E.A., Le Kh.N., Trachenko V.A., Skorodumov S.V., Papina K.B., Chin' Kh.Ch. Otsenka stroeniia izlomov i struktur v konstruksionnykh staliakh s ispol'zovaniem komp'yuterizirovannykh protsedur [Evaluation of fracture structure and structures in structural steels using computerized procedures]. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 4 (34), pp. 44–52.

26. Gerasimova L.P. Izlomny konstruksionnykh staley [Breaks in structural steels]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p.

Получено 15.01.2020

Опубликовано 25.03.2020

#### Сведения об авторах

**Абашкин Евгений Евгеньевич** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального научно-исследовательского центра ДВО РАН; e-mail: abashkine@mail.ru.

**Жилин Сергей Геннадьевич** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального научно-исследовательского центра ДВО РАН; e-mail: zhilin@imim.ru.

**Комаров Олег Николаевич** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального научно-исследовательского центра ДВО РАН; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

#### About the authors

**Evgenij E. Abashkin** (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Junior Researcher, Laboratory Problems of Creating and Processing Materials and Products, Institute of Machinery and Metallurgy of Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of RAS; e-mail: abashkine@mail.ru.

**Sergey G. Zhilin** (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory Problems of Creating and Processing Materials and Products, Institute of Machinery and Metallurgy of Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of RAS; e-mail: zhilin@imim.ru.

**Oleg N. Komarov** (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory Problems of Creating and Processing Materials and Products, Institute of Machinery and Metallurgy of Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of RAS; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.