

DOI: 10.1559/2224-9877/2016.3.09

УДК 669.018.29:539.49

Г.С. Шайманов¹, М.Ю. Симонов¹, Ю.Н. Симонов¹, А.С. Перцев²¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия² АО «Пермский научно-исследовательский технологический институт», Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 09Г2С ПОСЛЕ ХОЛОДНОЙ РАДИАЛЬНОЙ КОВКИ

Проведено исследование динамической трещиностойкости, микромеханизма роста трещины и характеристик прочности трубных заготовок из конструкционной стали 09Г2С после термической и деформационно-термической обработки. Термическую и деформационно-термическую обработку осуществляли на трубной заготовке в шахтной печи по четырем режимам, включающим получение исходного термоулучшенного состояния, холодную радиальную ковку (ХПК) трубных заготовок в исходном состоянии со степенью деформации 55 %, и последеформационные нагревы до температур 300 и 600 °С.

Показано положительное влияние холодной радиальнойковки с последеформационным нагревом на характеристики прочности и динамической трещиностойкости стали. Установлено, что максимальные прочностные характеристики материала реализуются при последеформационном нагреве до температуры 300 °С. Повышение температуры последеформационного нагрева до 600 °С сопровождается ростом ударной вязкости и динамической трещиностойкости до уровня термоулучшенного состояния при повышенном, относительно исходного состояния, значении критической длины трещины.

Исследование рельефа поверхности разрушения после различных режимов обработки с помощью электронно-фрактографического анализа показало, что микромеханизм роста трещины является вязким. Микрорельеф поверхностей разрушения представлен уплотненными ямками-конусами, глубокими ямками-тоннелями и микроямками.

По результатам количественной оценки элементов поверхности разрушения каждому режиму термической и деформационно-термической обработки поставлены в соответствие доля и размеры элементов поверхности излома. Установлено, что параметры элементов поверхности разрушения стали 09Г2С после ХПК и ХПК с последеформационным нагревом на температуру 300 °С, как и характеристики динамической трещиностойкости, находятся на одном уровне. Последеформационный нагрев на температуру 600 °С приводит к росту динамической трещиностойкости, что сопровождается ростом доли и диаметральных размеров элементов поверхности разрушения.

Ключевые слова: холодная пластическая деформация, радиальная ковка, массивная пластическая деформация, ударная вязкость, динамическая трещиностойкость, деформационно-термическая обработка, механизм роста трещины, фрактографические элементы, диспергирование структуры, ультрамелкое зерно, конструкционная сталь.

G.S. Shaimanov¹, M.Yu. Simonov¹, Yu.N. Simonov¹, A.S. Pertsev²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² JC "Perm Research Technological Institute", Perm, Russian Federation

SPECIAL FEATURES OF THE FRACTURE SURFACE OF STRUCTURAL STEEL 09G2S AFTER COLD RADIAL FORGING

The strength and crack growth micromechanisms are studied in pipe preforms from steel 09G2S after deformation and heat treatment. The tube preforms were treated by 4 modes: heat refining and cold plastic deformations by radial forging with the total degree of deformation equal 55 % followed by annealing at the temperatures 300 and 600 °C.

The radial forging with subsequent post-deformation annealing is shown to affect positively the strength and the dynamic crack resistance of the metal. Annealing of steel 09G2S at 300 °C after deformation by the method of radial forging raises strength characteristics to maximum level. The ductility and toughness characteristics are decrease. The impact toughness and dynamic crack resistance of the preforms subjected to radial forging and annealing at 600 °C is close to the initial values.

The results of the electron microscope studies of the fracture surfaces of treaded steel 09G2S show that the main components of the relief are flat-bottom dimples accompanied by deep tube dimples and micro dimples.

Quantitative analysis of the micromechanism of crack growth is made after tests for dynamic crack resistance. The law of variation of the sizes of microscopic dimples of various types is determined to each mode of treatment. The dynamic crack resistance and size parameters of microscopic dimples in the fractures of deformed pipe preforms and preforms annealed at 300 °C have same values. The size parameters of microscopic dimples in the fractures and dynamic crack resistance of the preforms subjected to radial forging and annealing at 600 °C is increase.

Keywords: cold plastic deformation, radial forging, severe plastic deformation, impact toughness, dynamic crack resistance, thermo-mechanical treatment, crack growth mechanism, fractographic elements, dispersion of the structure, ultra-fine grain, structural steel.

Введение

Диспергирование структуры является наиболее распространенным способом повышения комплекса механических свойств конструкционных сталей, так как позволяет одновременно повысить как характеристики прочности, так и характеристики сопротивления хрупкому разрушению [1–3]. Известны способы диспергирования структуры металлов, основанные на применении интенсивной пластической деформации (ИПД) [4–12] или сочетании методов ИПД и термической обработки [13]. Эффективным способом реализации пластической деформации металла в промышленных условиях является метод холодной радиальнойковки (ХРК). ХРК позволяет существенно повысить уровень как прочности, так и надежности сталей, особенно если исходным состоянием заготовок перед ХРК являлось высоковязкое состояние

[14, 15]. При этом несомненный интерес представляет комплексное исследование механических свойств, структуры и рельефа поверхности образцов, прошедших испытания на динамическую трещиностойкость.

Целью данной работы является установление взаимосвязи между особенностями рельефа изломов и характеристиками динамической трещиностойкости, прочности стали 09Г2С после различных режимов термической и деформационно-термической обработки.

Материалы и методики исследования

Исследовали трубные заготовки $\varnothing 70 \times 15$ мм из конструкционной стали 09Г2С. Химический состав стали, мас. %: 0,11 С; 0,50 Si; 1,26 Mn; 0,005 S; 0,017 P; 0,22 Cr; 0,18Ni; 0,14 Cu; 0,14 Mo.

Термическую и деформационно-термическую обработку проводили на трубной заготовке в шахтной печи по следующим режимам:

Режим 1. Термическое улучшение (ТУ) – закалка в воду с температуры 920 °С, отпуск при температуре 570 °С, выдержка 1 ч, охлаждение в воде.

Режим 2. ТУ + радиальная ковка (РК) с общей степенью деформации 55 % (РК ($\epsilon = 55 \%$)).

Режим 3. ТУ + РК ($\epsilon = 55 \%$) + отжиг при температуре 300 °С, выдержка 1 ч, охлаждение в воде.

Режим 4. ТУ + РК ($\epsilon = 55 \%$) + отжиг при температуре 600 °С, выдержка 1 ч, охлаждение в воде.

Испытания на ударный изгиб проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78 на образцах с размерами 6,5×11,5×55 мм. На рис. 1 представлена схема вырезки образцов из трубной заготовки после 1-го и 2-го режимов обработки.

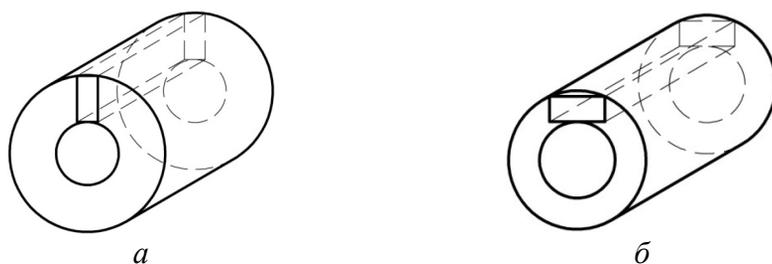


Рис. 1. Схема вырезки образцов из трубной заготовки: *а* – после ТУ (режим 1); *б* – после ТУ + РК ($\epsilon = 55 \%$) (режим 2)

Для выращивания трещины-концентратора на образцах использовали вибрационную машину Дроздовского; испытания проводили на маятниковом копре МК-30 при комнатной температуре. Геометрические параметры образцов и изломов определяли с помощью стереомикроскопа Olympus SZX-16 с точностью $\pm 0,05$ мм. Ударную вязкость рассчитывали по формуле

$$\text{КСТ} = \frac{A_p}{F}, \quad (1)$$

где A_p – работа разрушения, снимаемая со шкалы копра с точностью до $\pm 0,05$ кГ·м; F – площадь живого сечения образца, см².

Оценку ударной вязкости в условиях, максимально приближенных к плоской деформации, проводили по методике, описанной в работах [16–18] и патенте¹ на образцах с двумя дополнительными боковыми V-образными надрезами, глубина которых составляла 1,0 мм.

С помощью цифрового фотоаппарата Canon Digital IXUS 130 получили фотографии изломов образцов исследуемой стали.

Характеристики прочности и пластичности определяли на коротких цилиндрических образцах с начальным диаметром 5 мм по ГОСТ 1497–84 на универсальной гидравлической системе для статических испытаний INSTRON-SATEC 300LX. Результаты испытаний обрабатывали с построением диаграмм растяжения в программе Bluehill. Для анализа характеристик механических свойств определяли условный предел текучести $\sigma_{0,2}$. Относительное сужение ψ оценивали по изменению диаметра образца. После каждого режима обработки испытывали не менее четырех образцов.

Исследование микромеханизма разрушения проводили на половинках ударных образцов с двумя дополнительными надрезами глубиной 1 мм с помощью сканирующего электронного микроскопа (FEI) PHENOM ProX при увеличении в 500–2000 раз и ускоряющем напряжении 15 кВ.

¹ Способ оценки ударной вязкости высоковязких листовых конструкционных сталей: пат. 2485476 Российская Федерация: МПК G 01 N 3/30 / Симонов Ю.Н., Симонов М.Ю., Панов Д.О., Касаткин А.В., Подузов Д.П.; заявитель и патентообладатель Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. № 2012100595/28; заявл. 10.01.2012; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17. 14 с.

С помощью программного пакета Olympus Stream Motion 1.8 проводили вычисление площади ямок с помощью инструмента оценки площади по замкнутому контуру. Анализ проводился на электронно-микроскопических изображениях, общее количество полей не менее 30. На изображениях оценивали объекты, которые отождествлялись ямками. Площадь каждой ямки вычисляли с помощью замыкания контура микроберегов пластической деформации с использованием инструмента оценки площади по замкнутому контуру. Далее проводили унифицирование свободной формы ямки в окружность, $S_{\text{ямки}} = S_{\text{круга}}$, затем рассчитывали диаметр крупных (более 3 мкм) ямок как диаметр унифицированной окружности по формуле

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{круга}}}{\pi}}. \quad (2)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты динамических испытаний образцов по ГОСТ 9454–78 с варьируемой относительной длиной трещины $\lambda = 0,25 \dots 0,7$ и образцов с двумя дополнительными надрезами и различной длиной трещины по методике [19] представлены на диаграмме динамической трещиностойкости (ДТ) (рис. 2).

Результаты оценки уровня динамической трещиностойкости в исходном состоянии (режим 1) показали, что уровень параметра $KCT^* \equiv G_{Ic}^d$ для стали 09Г2С равен 124 Дж/см², при этом критическая величина относительной длины трещины $\lambda^* = 0,68$. Проведение режима 2 привело к понижению уровня KCT^* до 82 Дж/см². Также наблюдали уменьшение параметра критической величины относительной длины трещины $\lambda^* = 0,68$. Проведение обработки по режиму 3 привело к еще большему снижению уровня ДТ до $KCT^* = 73$ Дж/см². Наряду с уменьшением ДТ наблюдалось уменьшение значения параметра λ^* , который понизился до 0,60. Проведение обработки по режиму 4 привело к увеличению уровня ДТ (KCT^*) до 117 Дж/см², при этом наблюдали значительное увеличение параметра λ^* , до 0,78, что свидетельствует об увеличении сопротивления распространения трещины в условиях плоскодеформированного состояния.

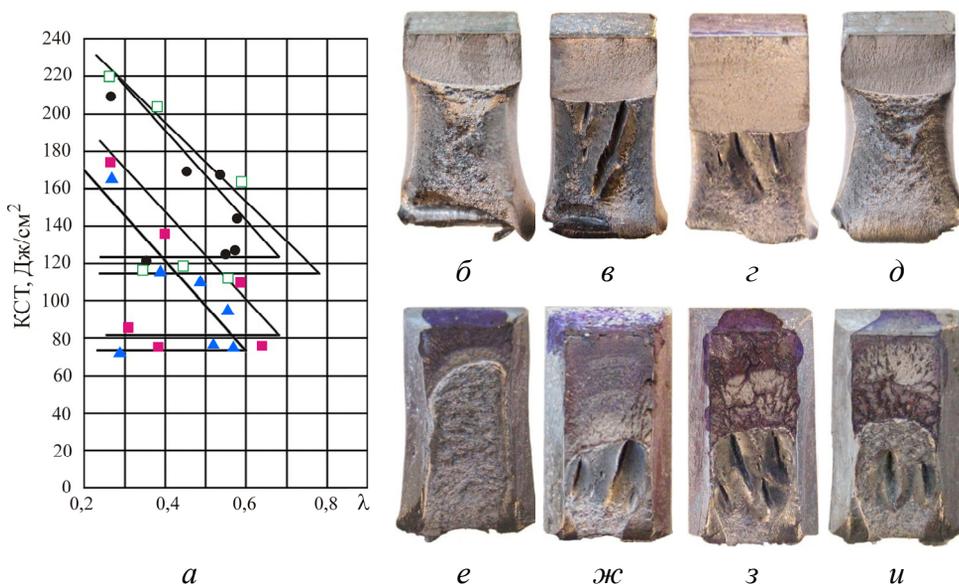


Рис. 2. Диаграмма динамической трещиностойкости стали 09Г2С (а), обработанной по режимам 1 (●), 2(■), 3 (▲), 4 (□), и изломы: б, е – режим 1; в, ж – режим 2; г, з – режим 3; д, и – режим 4; б, в, г, д – образцы с варьируемой длиной трещины без дополнительных боковых надрезов $\lambda = 0,30; 0,40; 0,56; 0,38$ соответственно; е, ж, з, и – образцы с двумя дополнительными боковыми надрезами глубиной 1 мм и варьируемой длиной трещины $\lambda = 0,35; 0,64; 0,56; 0,55$ соответственно

Характеристики прочности материала после деформационно-термической обработки подробно изучены в работе [19]. Результаты испытаний стали на одноосное растяжение, а также параметры динамической трещиностойкости представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики ударной вязкости, динамической трещиностойкости, прочности и пластичности стали 09Г2С

Режим обработки	КСТ, Дж/см ²	Динамическая трещиностойкость			$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ
		КСТ*, Дж/см ²	R, Дж/см ²	λ^*				
1	210	124	250	0,68	520	650	33	79
2	175	82	237	0,68	770	825	17,5	69,5
3	165	73	240	0,60	810	820	13	70,5
4	220	117	165	0,78	560	595	23	74

С помощью электронно-фрактографического анализа поверхности разрушения образцов с боковыми надрезами стали 09Г2С после различных режимов деформационно-термической обработки было выявлено, что разрушение всех образцов происходило по вязкому, ямочному механизму. Однако морфология и размеры этих ямок для разных режимов обработки весьма различны. Микромеханизм роста трещины представлен уплощенными ямками-конусами (УЯК), глубокими ямками-тоннелями (ЯТ) и микроямками (МК) (рис. 3–6, а).

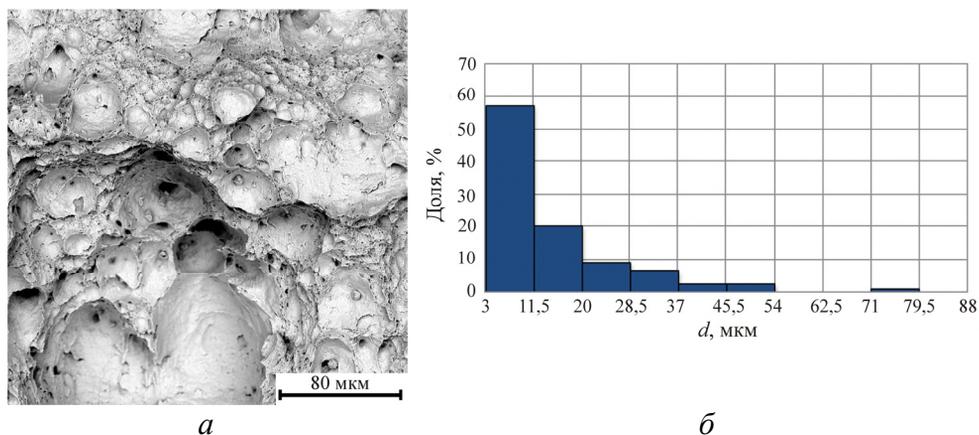


Рис. 3. Поверхность разрушения (а) и гистограмма распределения ямок по диаметрам (б) стали 09Г2С, обработанной по 1-му режиму

Результаты количественной оценки параметров элементов рельефа поверхности разрушения представлены в табл. 2. Стоит отметить, что после проведения термического улучшения (режим 1) на поверхности разрушения (см. рис. 3, а) наблюдаются УЯК больших размеров, максимальный диаметр которых составляет ~88 мкм (рис. 3, б). Доля поверхности разрушения, занятая крупными ямками в исходном состоянии, составляет 68,5 %.

Проведение обработки по режиму 2 приводит к снижению доли крупных ямок в изломе примерно на 10 % и составляет 57,5 %. Также наблюдается уменьшение максимального размера УЯК до ~72 мкм (рис. 4, а, б).

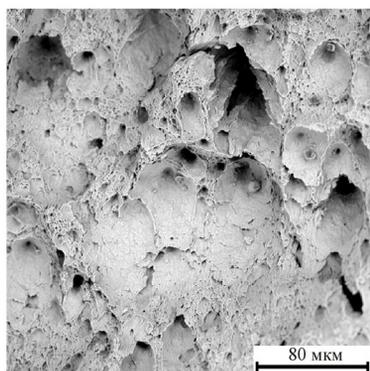
После проведения обработки по режиму 3 на поверхности разрушения (рис. 5, а) наблюдается незначительное увеличение максимальных размеров ямок-конусов до ~81 мкм по сравнению с режимом 2 (рис. 5, б). Доля крупных ямок в изломе после обработки по 3-му режиму составила 59 %.

Таблица 2

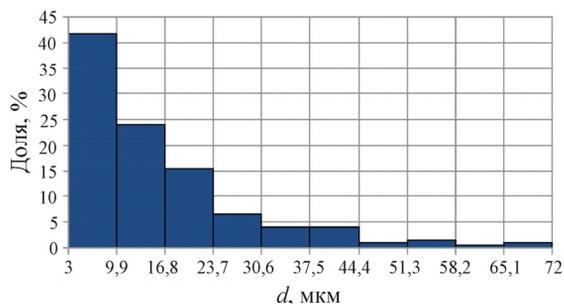
Результаты количественной оценки параметров ямок

Режим обработки	$\omega_{\text{П}}$, %	$\omega_{\text{МК}}$, %	$D_{\text{макс}}$, МКМ	$D_{\text{ср}}$, МКМ
1	70,9	29,1	88,3	15,2
2	58,7	41,3	71,6	16,2
3	59,6	40,4	81,6	15,9
4	70,4	29,6	101,8	22,3

Примечание: $\omega_{\text{П}}$ – доля крупных УЯК и ЯТ; $\omega_{\text{МК}}$ – доля микроямок; $D_{\text{макс}}$ – максимальный диаметр крупной ямки; $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр ямок.

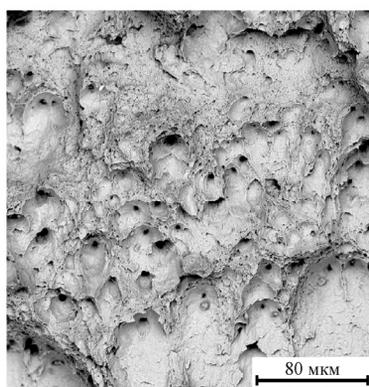


а

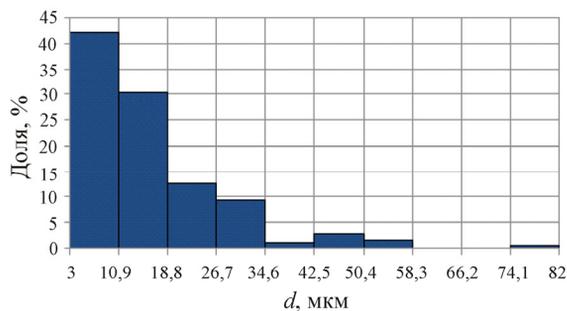


б

Рис. 4. Поверхность разрушения (а) и гистограмма распределения ямок по диаметрам (б) стали 09Г2С, обработанной по 2-му режиму



а



б

Рис. 5. Поверхность разрушения (а) и гистограмма распределения ямок по диаметрам (б) стали 09Г2С, обработанной по 3-му режиму

После проведения обработки по режиму 4 доля крупных ямок в изломе составляет 69 %. Максимальный диаметр крупных ямок достигает ~101 мкм (рис. 6, б), что на 10–11 % больше по сравнению с исходным состоянием. Гистограммы распределения ямок по диаметрам для всех режимов обработки имеют одномодальный характер с положительной асимметрией.

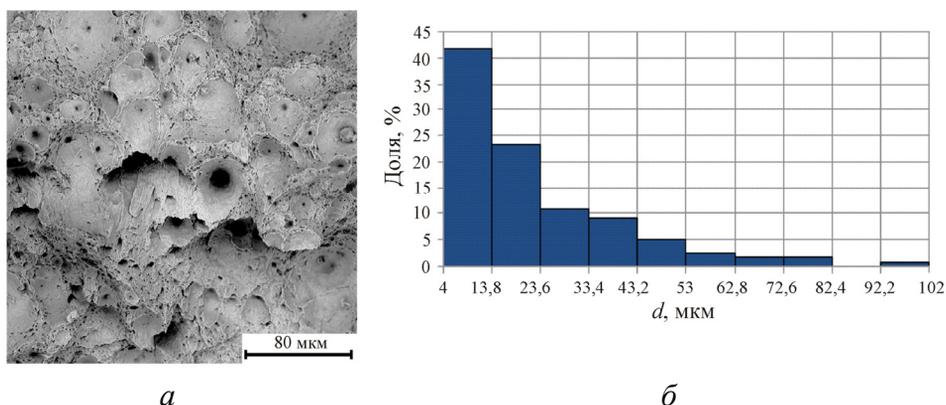


Рис. 6. Поверхность разрушения (а) и гистограмма распределения ямок по диаметрам (б) стали 09Г2С, обработанной по 4-му режиму

Электронно-фрактографический анализ поверхности разрушения показал, что УЯК зарождались преимущественно на сферических (глобулярных) включениях (рис. 7, а). После проведения режимов 2–4 наряду с УЯК наблюдали глубокие ЯТ, которые, в свою очередь, образовывались преимущественно на стержневых включениях (рис. 7, б). Аналогичные закономерности образования элементов рельефа поверхности разрушения наблюдали в работе [14].

Размерные и количественные характеристики фрактурных элементов для всех режимов представлены в табл. 2.

Для проведения совместного анализа всех полученных результатов использовали данные табл. 1, 2. Анализ результатов показал, что прочность и динамическая трещиностойкость незначительно зависят от среднего размера ямок, однако достаточно сильно зависят от доли крупных ямок на поверхности разрушения. Из графиков на рис. 8, а, б видно, что ударная вязкость, динамическая трещиностойкость и характеристики прочности стали 09Г2С, обработанной по режимам 2, 3, находятся примерно на одном уровне, при этом средний диаметр круп-

ных элементов поверхности разрушения равен ~ 16 мкм и их доля составляет ~ 59 %. Увеличение доли крупных ямок на поверхности разрушения до 70 % приводит к значительному росту динамической трещиностойкости: 124 и 117 Дж/см² для режимов обработки 1 и 4 соответственно.

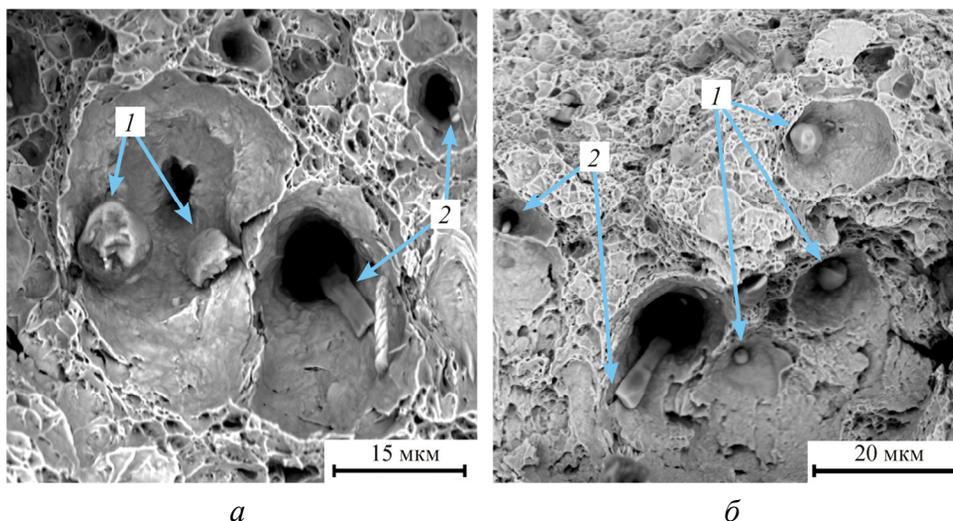


Рис. 7. Образование элементов поверхности разрушения на глобулярных (1) и стержневых (2) включениях: а – сталь 09Г2С, режим 2; б – сталь 35Х, ТУ + РК ($\epsilon = 55$ %)

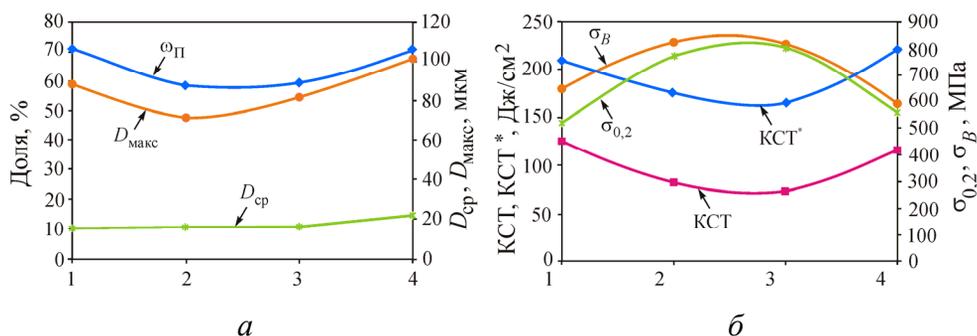


Рис. 8. Изменение геометрических, количественных характеристик микроямок (а) и механических свойств (б) в зависимости от режима обработки

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Совместный анализ параметров ДТ, характеристик прочности и пластичности показал, что максимальный уровень предела прочности и предела текучести реализуется в стали 09Г2С после проведения обработки по режиму 3. При этом ударная вязкость и динамическая трещиностойкость имеют минимальные значения.

2. Показано, что после проведения различных режимов деформационно-термической обработки микромеханизм роста трещины является вязким, микрорельеф поверхности разрушения представлен уплощенными ямками-конусами, глубокими ямками-тоннелями и микроямками.

3. Установлено, что количественные характеристики элементов рельефа поверхности разрушения после обработки по режимам 1, 4 и 2, 3 находятся примерно на одном уровне, при этом параметры ударной вязкости, динамической трещиностойкости, прочности изменяются незначительно, в среднем на 6 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0134 от 01.12.2015 в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. – М.: Металлургия, 1982. – 182 с.

2. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей // МиТОМ. – 2009. – № 6. – С. 3–7.

3. Принципы легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких свариваемых судостроительных сталей / И.В. Горынин, В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова // МиТОМ. – 2007. – № 1. – С. 9–15.

4. Dispersion of the structure of steel 35Kh up to nanolevel with the aim of creating a material for pressure vessels / Yu.N. Simonov,

A.P. Nishta, S.S. Yugay, A.S. Pertsev // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2011. – Vol. 52, № 11. – P. 517–522.

5. Microstructural changes in equal channel angular pressed low carbon steel by static annealing / D.H. Shin, B.C. Kim, K.-T. Park, W.Y. Choo // *Acta Mater.* – 2000. – Vol. 48, № 12. – P. 3245–3252.

6. Han B.Q., Yue S. Processing of ultrafine ferrite steels // *J. Mater. Proc. Techn.* – 2003. – Vol. 136, № 1–3. – P. 100–104.

7. Formation of enhanced mechanical characteristics in commercial preforms from steel 35Kh by thermomechanical action / A.S. Pertsev, Yu.N. Simonov, A.V. Kasatkin, A.D. Bukhalov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2013. – Vol. 54, № 11. – P. 565–570.

8. Сэстри Ш.М.Л., Добаткин С.В., Сидорова С.В. Формирование субмикроструктурной структуры в стали 10Г2ФТ при холодном равноканальном угловом прессовании и последующем нагреве // *Металлы*. – 2004. – № 2. – С. 28–35.

9. Теплое и горячее равноканальное угловое прессование низкоуглеродистых сталей / С.В. Добаткин, П.Д. Одесский, Р. Пиппан, Г.И. Рааб, Н.А. Красильников, А.М. Арсенкин // *Металлы*. – 2004. – № 1. – С. 110–119.

10. Microstructure and properties of a low-carbon steel processed by equal-channel angular pressing / J.T. Wang, C. Xu, Z.Z. Du, G.Z. Qu, T.G. Langdon // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2005. – Vol. 410–411. – P. 312–315.

11. Microstructural development of adiabatic shear bands in ultrafine-grained low-carbon steels fabricated by equal channel angular pressing / B. Hwang, S. Lee, Y.C. Kim, N.J. Kim, D.H. Shin // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2006. – Vol. 441, № 1–2. – P. 308–320.

12. Microstructural characterization of low-carbon steel processed by high pressure torsion and annealing / E.G. Astafurova, S.V. Dobatkin, E.V. Naydenkin, S.V. Shagalina, G.G. Zakharova // *Materials Science Forum*. – 2008. – Vol. 584–586. – P. 649–654.

13. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

14. Effect of structure on the dynamic crack resistance and special features of the micromechanism of crack growth in steel 35Kh after cold radial forging / M.Yu. Simonov, G.S. Shaimanov, A.S. Pertsev, Yu.N. Simonov, A.N. Knyazeva, K.A. Shibanova, A.I. Smirnov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2016. – Vol. 58, № 1. – P. 82–90.

15. Формирование структуры и механических свойств конструкционной стали при холодной пластической деформации методом радиальнойковки / А.С. Перцев, Д.О. Панов, Ю.Н. Симонов, А.И. Смирнов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 1(62). – С. 32–38.

16. Георгиев М.Н., Симонов Ю.Н., Симонов М.Ю. Влияние длины трещины и боковых надрезов на реализацию условий плоской деформации при ударном нагружении // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2010. – Т. 76, № 9. – С. 56–58.

17. Георгиев М.Н., Симонов М.Ю., Симонов Ю.Н. Оценка работы разрушения ударных образцов с боковыми надрезами // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2012. – Т. 78, № 9. – С. 56–61.

18. Structure, dynamic crack resistance and fracture mechanisms of quenched and tempered structural steels / M.Yu. Simonov, Yu.N. Simonov, A.M. Khanov, G.S. Shaimanov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2013. – Vol. 54, № 11. – P. 587–594.

19. Механотермическая обработка контрукционной низкоуглеродистой стали 09Г2С / А.С. Перцев, Д.О. Панов, А.И. Смирнов, Ю.Н. Симонов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6. – С. 32.

References

1. Pikerin F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka stalei* [Physical metallurgy of steels and development]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 182 p.

2. Rybin V.V., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I. *Tekhnologii sozdaniia konstruktsionnykh nanostrukturirovannykh stalei* [Technologies for producing nanostructured structural steels]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 2009, no. 6, pp. 3-7.

3. Gorynin I.V., Rybin V.V., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I. *Printsipy legirovaniia, fazovye prevrashcheniia, struktura i svoistva khladostoiikh svarivaemykh sudostroitel'nykh stalei* [Principles of doping, phase transformations, structure and properties of cold-resistant welded steel shipbuilding]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 2007, no. 1, pp. 9-15.

4. Simonov Yu.N., Nishta A.P., Yugay S.S., Pertsev A.S. Dispersion of the structure of steel 35Kh up to nanolevel with the aim of creating a ma-

terial for pressure vessels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011. vol. 52, no. 11, pp. 517-522.

5. Shin D.H., Kim B.C., Park K.-T., Choo W.Y. Microstructural changes in equal channel angular pressed low carbon steel by static annealing. *Acta Mater.*, 2000, vol. 48, no. 12, pp. 3245-3252.

6. Han B.Q., Yue S. Processing of ultrafine ferrite steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 136, no. 1-3, pp. 100-104.

7. Pertsev A.S., Simonov Yu.N., Kasatkin A.V., Bukhalov A.D. Formation of enhanced mechanical characteristics in commercial preforms from steel 35Kh by thermomechanical action. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 54, no. 11, pp. 565-570.

8. Sestri Sh.M.L., Dobatkin S.V., Sidorova S.V. Formirovanie submikrokristallicheskoj struktury v stali 10G2FT pri kholodnom ravnokanal'nom uglovom pressovanii i posleduiushchem nagreve [Formation submicrocrystalline structure in steel 10G2FT at cold equal-channel angular pressing and subsequent heating]. *Metally*, 2004, no. 2, pp. 28-35.

9. Dobatkin S.V., Odesskii P.D., Pippin R., Raab G.I., Krasil'nikov N.A., Arsenkin A.M. Teploe i goriachee ravnokanal'noe uglovoe pressovanie nizko-uglerodistykh stali [Warm and hot equal channel angular pressing low-carbon steels]. *Metally*, 2004, no. 1, pp. 110-119.

10. Wang J.T., Xu C., Du Z.Z., Qu G.Z., Langdon T.G. Microstructure and properties of a low-carbon steel processed by equal-channel angular pressing. *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, vol. 410-411, pp. 312-315.

11. Hwang B., Lee S., Kim Y.C., Kim N.J., Shin D.H. Microstructural development of adiabatic shear bands in ultra-fine-grained low-carbon steels fabricated by equal channel angular pressing. *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, vol. 441, no. 1-2, pp. 308-320.

12. Astafurova E.G., Dobatkin S.V., Naydenkin E.V., Shagalina S.V., Zakharova G.G. Microstructural characterization of low-carbon steel processed by high pressure torsion and annealing. *Materials Science Forum*, 2008, vol. 584-586, pp. 649-654.

13. Bernshtein M.L., Zaimovskii V.A., Kaputkina L.M. Termomekhanicheskaja obrabotka stali [Steel thermomechanical processing]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 480 p.

14. Simonov M.Yu., Shaimanov G.S., Pertsev A.S., Simonov Yu.N., Knyazeva A.N., Shibanova K.A., Smirnov A.I. Effect of structure on the dynamic crack resistance and special features of the micromechanism of

crack growth in steel 35Kh after cold radial forging. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, vol. 58, no. 1, pp. 82-90.

15. Pertsev A.S., Panov D.O., Simonov Iu.N., Smirnov A.I. Formirovanie struktury i mekhanicheskikh svoystv konstruktsionnoi stali pri kholodnoi plasticheskoi deformatsii metodom radial'noi kovki [Formation of structure and mechanical properties of structural steel at a cold plastic deformation by radial forging]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2014, no. 1(62), pp. 32-38.

16. Georgiev M.N., Simonov Iu.N., Simonov M.Iu. Vliianie dliny treshchiny i bokovykh nadrezov na realizatsiiu uslovii ploskoi deformatsii pri udarnom nagruzhenii [Influence of crack length and lateral incisions in the implementation of the plane strain conditions under impact loading]. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov*, 2010, vol. 76, no. 9, pp. 56-58.

17. Georgiev M.N., Simonov M.Iu., Simonov Iu.N. Otsenka raboty razrusheniia udarnykh obraztsov s bokovymi nadrezami [Evaluation of the fracture of impact samples with side slit]. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov*, 2012, vol. 78, no. 9, pp. 56-61.

18. Simonov M.Yu., Simonov Yu.N., Khanov A.M., Shaimanov G.S. Structure, dynamic crack resistance and fracture mechanisms of quenched and tempered structural steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 54, no. 11, pp. 587-594.

19. Pertsev A.S., Panov D.O., Smirnov A.I., Simonov Iu.N. Mekhano-termicheskaia obrabotka kontruktсионnoi nizkouglerodistoi stali 09G2S [Mechanical and thermal treatment of structural mild steel 09G2S]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2013, no. 6, pp. 32.

Получено 2.02.2016

Об авторах

Шайманов Григорий Сергеевич (Пермь, Россия) – инженер учебной научно-производственной лаборатории, ассистент кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: mto@pstu.ru.

Симонов Михаил Юрьевич (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник кафедры «Металловедение, термическая и лазерная об-

работка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: mto@pstu.ru.

Симонов Юрий Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: mto@pstu.ru.

Перцев Алексей Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, заместитель главного металлурга АО «Пермский научно-исследовательский технологический институт»; e-mail: Ogmet@pniti.ru.

About the authors

Gregory S. Shaimanov (Perm, Russian Federation) – Engineer, Academic Scientific and Production Laboratory, Assistant, Department of Metal Science, Laser and Heat Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: mto@pstu.ru.

Michail Yu. Simonov (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Department of Metal Science and Heat Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: mto@pstu.ru.

Yurii N. Simonov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Metal Science, Laser and Heat Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: mto@pstu.ru.

Aleksei S. Pertsev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Chief Metallurgist Deputy, JC “Perm Research Technological Institute”; e-mail: ogmet@pniti.ru.