

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-17-36>**Влияние качества шихты на физико-механические и эксплуатационные свойства низколегированной стали 30ХГСА****Н. Н. Сергеев¹, А. Н. Сергеев¹, С. Н. Кутепов¹, И. В. Тихонова²,
А. Е. Гвоздев¹, Е. В. Агеев³ ✉, Д. С. Клементьев¹**¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина 125, г. Тула 300026, Российская Федерация² ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
пр. Ленина 92, г. Тула 300012, Российская Федерация³ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель работы – исследование влияния качества первородной шихты на комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств конструкционной низколегированной стали 30ХГСА.

Методы. В качестве объекта исследования был выбран типичный представитель конструкционных низколегированных сталей – сталь 30ХГСА, выплавленная с использованием металлургических окатышей губчатого железа, обычного металлического лома и заготовки, полученные методом кипящего шлакового слоя. В соответствии с поставленными задачами исследования сталь 30ХГСА различных плавок, полученная на различной шихте, имела одинаковые условия выплавки, вакуумирования, раскисления, разливки и кристаллизации. Температура разливки составила 1600...1620 °С, после вакуумной обработки – 1530...1560 °С. Длительность вакуумирования – 5 минут. Разливку плавок осуществляли в чугунные изложницы сифоном в течение 4...5 минут. Раскисление проводили в ковше алюминием в количестве 4...4,5 кг/плавку. После затвердевания слитки охлаждали в специальных колодцах. Слитки разрезали на 3 части: головную, срединную и донную (размером 600×600 мм). Среднюю часть затем в горячую ковали и катали до прутка Ø30 мм. Длина прутка составляла 2...3,4 м. После горячей деформации прутки охлаждали на воздухе.

Результаты. Проведены механические испытания. Выполнена статистическая обработка экспериментальных результатов. Выявлены закономерности изменения характеристик механических свойств: временного сопротивления, предела текучести, относительного сужения площади поперечного сечения образца, относительного удлинения начальной рабочей длины, ударной вязкости (σ_B , $\sigma_{0,2}$, ψ , δ , a_K).

Заключение. Установлено, что с возрастанием температуры механические свойства стали 30ХГСА, выплавленной на различных шихтах, уменьшаются. Порог хладноломкости стали 30ХГСА ниже у более чистых плавок на губчатом железе и полупродукте КШС, величина ударной вязкости при низких температурах выше, чем в плавке на обычной металлургической шихте. Заметное разупрочнение начинается с температуры отпуска равной 300 °С. Температура максимальной отпускной хрупкости для стали 30ХГСА, выплавленной на обычной металлургической шихте, составляет 550 °С. Показано, что сталь 30ХГСА, выплавленная на чистой первородной шихте (губчатое железо), имеет меньшую склонность к отпускной хрупкости, чем сталь, выплавленная на обычной шихте. Величина ударной вязкости стали этой плавки выше, чем стали обычной выплавки во всем интервале температур отпуска.

Ключевые слова: хладноломкость; поверхностно-активные примеси; граница зерен; первородная шихта; ударная вязкость; отпуск.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Для цитирования: Влияние качества шихты на физико-механические и эксплуатационные свойства низколегированной стали 30ХГСА / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, И. В. Тихонова, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 17-36. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-17-36>.

Поступила в редакцию 10.02.2020

Подписана в печать 26.03.2020

Опубликована 20.04.2020

Influence of Charge Quality on Physical, Mechanical and Operational Properties of Low-Alloy Steel 30KHGSA

Nikolay N. Sergeev¹, Alexander N. Sergeev¹, Sergei N. Kutepov¹,
Irina V. Tikhonova², Alexander E. Gvozdev¹,
Evgeny V. Ageev³ ✉, Denis S. Klement'yev¹

¹ Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

² Tula State University
92 Lenin str., Tula 300012, Russian Federation

³ Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to study the influence of the quality of the original charge on the complex of physical, mechanical and operational properties of structural low-alloy steel 30HGSA.

Methods. As an object of research, a typical representative of low-alloy structural steels has been chosen - steel 30HGSA, smelted using metallized sponge iron pellets, ordinary scrap metal and billets obtained by the method of a boiling slag layer. In accordance with the set objectives of the study, steel 30HGSA of various melts, obtained with different charge, had the same conditions for melting, evacuation, deoxidation, casting and crystallization. The casting temperature was 1600... 1620 °C and the post-vacuum treatment temperature was 1530... 1560 °C. Duration of evacuation - 5 minutes. Casting of melts was carried out into cast iron molds with a siphon for 4 ... 5 minutes. Deoxidation was carried out in a ladle with aluminum in the amount of 4 ... 4.5 kg / melt. After solidification, the ingots were cooled in special wells. The ingots were cut into 3 parts: head, middle and bottom (600 × 600 mm). The middle part was then hot forged and rolled to a Ø30 mm bar. The length of the rod was 2 ... 3.4 m. After hot deformation, the rods were cooled in air.

Results. Mechanical tests have been carried out. Statistical processing of experimental results has been performed. Regularities of changes in the characteristics of mechanical properties have been revealed: tensile strength, creep strength, relative narrowing of the cross-sectional area of the sample, relative elongation of the initial working length, impact strength (σ_B , $\sigma_{0.2}$, ψ , δ , aH).

Conclusion. It has been found that with an increase in temperature, the mechanical properties of steel 30HGSA, smelted on various charges, decrease. It has been established that the cold brittleness threshold of 30HGSA steel is lower for purer melts on spongy iron and intermediate product KShS, the value of impact toughness at low temperatures is higher

than in melting on a conventional metallized charge. Noticeable softening begins at a tempering temperature of 300 °C. The temperature of the maximum tempering brittleness for steel 30HGSA, melted on a conventional metallized charge, is 550 °C. It is shown that steel 30HGSA smelted with a pure original charge (spongy iron) has a lower tendency to temper brittleness than steel smelted with a conventional charge. The value of the impact toughness of the steel of this melt is higher than that of the steel of conventional melting over the entire tempering temperature range.

Keywords: cold brittleness; surface active impurities; grain boundary; original charge; impact strength; tempering.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was performed under project no. 11.6682.2017/8.9.

For citation: Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klement'yev D. S. Influence of Charge Quality on Physical, Mechanical and Operational Properties of Low-Alloy Steel 30KHGSA // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 17-36 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-17-36>.

Received 10.02.2020

Accepted 26.03.2020

Published 20.04.2020

Введение

Постоянно повышающиеся требования к качеству выпускаемой продукции черной и цветной металлургии ставят перед инженерами-технологами задачу получения сталей и сплавов, обладающих высоким комплексом физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств и способных воспринимать длительно действующие статические, динамические и циклические нагрузки без разрушения.

Одним из эффективных методов получения высококачественных сталей является применение в процессе ее выплавки чистой первородной шихты, свободной или почти свободной от вредных примесей [1, 2]. Причем, по мнению А.П. Гуляева [2], более важно иметь чистую шихту, чем удалять серу и газы сложными металлургическими приемами.

О причине улучшения физико-механических свойств стали, выплав-

ленной на первородной шихте, большинство авторов высказываются осторожно и предположительно. Одни видят причину в меньшем содержании примесей и неметаллических включений [3-5]; другие считают, что изменение свойств стали, выплавленной на первородной шихте, происходит из-за большего роста зерна при нагреве, чем у стали, выплавленной на ломе [1, 2]. Большинство авторов предполагает, что особые свойства стали, выплавленной на шихте прямого восстановления, вызваны строением, чистотой стали и состоянием границ зерен [1, 2, 4]. Однако вплоть до настоящего времени нет четкого представления о причине такого влияния шихты на свойства сталей.

Цель настоящей работы – исследование влияния качества первородной шихты на комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств конструкционной низколегированной стали 30ХГСА.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования был выбран типичный представитель конструкционных низколегированных сталей – сталь 30ХГСА, выплавленная с использованием металлизированных

окатышей губчатого железа (ГЖ), обычной металлической шихты (ОМШ) и методом кипящего шлакового слоя (КШС). Химический состав и характеристика плавок приведены в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав и характеристика исследуемых плавок

Table 1. Chemical composition and characteristics of the studied melts

№ плавки	Шихта	Внепечная обработка вакуумом	Химический состав, %							
			C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr
1	ГЖ	с обработкой	0,34	0,87	1,10	0,006	0,018	0,02	0,08	0,87
2	КШС	без обработки	0,29	0,89	0,91	0,009	0,017	0,04	0,05	1,10
3	ОМШ	с обработкой	0,34	1,02	0,98	0,011	0,017	0,16	0,12	0,87

В соответствии с поставленными задачами исследования сталь 30ХГСА различных плавок, выплавленная на различной шихте, имела одинаковые условия выплавки, вакуумирования, раскисления, разливки и кристаллизации. Температура разливки составила 1600...1620 °С, после вакуумной обработки – 1530...1560 °С. Длительность вакуумирования – 5 минут. Разливку плавок осуществляли в чугунные изложницы сифоном в течение 4...5 минут. Раскисление проводили в ковше алюминием в количестве 4...4,5 кг/плавку. После затвердевания слитки охлаждали в специальных колодцах. Слитки разрезали на 3 части: головную, среднюю и донную (размером 600×600 мм). Среднюю часть затем в горячую ковали и катали до прутка Ø30 мм. Длина прутка составляла 2...3,4 м. После горячей деформации прутки охлаждали на воздухе.

Для исследования механических свойств стали 30ХГСА проводили испытания на одноосное растяжение, ударный изгиб и измерение твердости. Отбор образцов (5 штук от каждой плавки) для испытаний носил случайный характер, что обязательно для получения надежного и точного результата. Ударную вязкость измеряли в диапазоне температур –80...+20 °С (через каждые 20 °С). Испытания на растяжение выполняли на разрывной машине Р-5, а на ударный изгиб – на маятниковом копре МК-30А. Образцы перед испытаниями подвергали следующей термической обработке – закалка от $t = 880$ °С в селитру до $t = 180$ °С, $\tau = 15$ мин; затем замочка в воде; отпуск образцов проводили при температурах 100...700 °С (через 100 °С), $\tau = 2$ часа, охлаждение на воздухе.

Виды образцов для испытаний на одноосное растяжение и ударный изгиб

приведены на рис. 1. После испытаний вычисляли следующие величины: временное сопротивление (σ_B , МПа), относительное сужение (ψ , %), относительное удлинение (δ , %) и ударную вязкость (a_H , Дж/см²).

Соответствующую статистическую обработку экспериментальных результатов проводили по методикам, приведенным в [6, 7, 8, 9].

Для исследования отпускной хрупкости стали 30ХГСА изготавливали образцы для испытаний на ударную вязкость типа I размерами 44×10×10 мм,

которые подвергали закалке от $t = 880^\circ\text{C}$ в селитру до $t = 180^\circ\text{C}$, $\tau = 15$ мин. Структура стали после такой обработки представляет мартенсит и остаточный аустенит (HRC 47–49). Отпуск проводили в камерной печи при температурах 500, 520, 525, 530, 535, 540, 545, 550, 555, 560, 570, 580, 600 °C партиями по 15 штук (по 5 образцов от каждой плавки). Продолжительность отпуска 2 часа, а затем медленное охлаждение с печью в течение трех часов. После отпуска структура стали сорбито-трооститная.

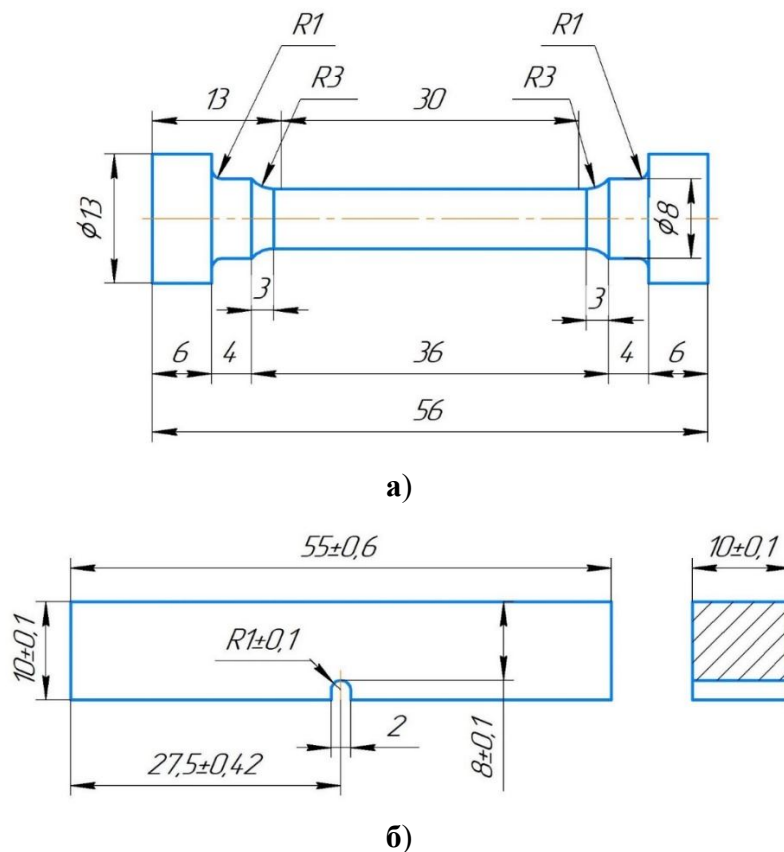


Рис. 1. Виды образцов для механических испытаний: **а** – на одноосное растяжение; **б** – на ударный изгиб

Fig. 1. Specimens for mechanical testing: **a** – uniaxial tension; **b** – the impact strength

Также проводили исследование хладноломкости стали 30ХГСА после проведения горячей деформации, улучшения и

охрупчивающего отпуска при температуре 550 °C в течение 50 часов.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний механических свойств стали 30ХГСА различных плавок после термической обработки приведены в табл. 2.

Из анализа табл. 2 видно, что после закалки и двухчасового отпуска при температуре 100...700 °С механические свойства (σ_B , $\sigma_{0,2}$, ψ , δ , a_H) образцов различных плавок изменяются от темпера-

туры закономерно, заметное разупрочнение начинается с температуры отпуска, равной 300 °С. По пределу прочности, относительному удлинению и твердости различий в плавках не наблюдается. Сталь, выплавленная на первородной шихте (плавка № 1 на ГЖ) при температуре отпуска 450 °С, имеет более высокие характеристики пластичности (ψ) и ударной вязкости (a_H).

Таблица 2. Механические свойства стали 30ХГСА в зависимости от температуры отпуска и вида шихты

Table 2. Mechanical properties of 30HGSA steel depending on the tempering temperature and the type of charge

Механические свойства	Шихта	Закалка	Температура отпуска, °С						
			100	200	300	400	500	600	700
HRC	ГЖ	48	48	48,6	56	53	57	62	68
	КШС	49	53,60	53,80	56,80	58	58	62	69
	ОМШ	50,50	49	53,6	55,80	56	52	59	67
σ_B , МПа	ГЖ	1730	1750	1700	1608	1400	1120	920	740
	КШС	1770	1770	1710	1592	–	–	930	750
	ОМШ	1700	1724	1650	1666	930	–	930	760
δ , %	ГЖ	9,40	13	13	12	13,40	15	20	25
	КШС	10,80	13,60	14,30	12,30	12,30	14	19	25
	ОМШ	12	14,30	14,70	12	13	13	18	25
ψ , %	ГЖ	42	48	48,60	56	53	57	62	68
	КШС	53,40	53,60	53,80	56,80	58	58	62	69
	ОМШ	49,60	49	53,60	55,80	56	52	59	67
a_H , Дж/см ²	ГЖ	70	73	77	75	76	112	226	243
	КШС	78	83	85	94	72	102	176	224
	ОМШ	80	86	88	100	89	88	177	232

Выявлено, что при низких температурах отпуска и особенно после закалки наблюдается разность в относительном сужении.

Как было отмечено выше, сталь 30ХГСА разных плавок различается и по величине ударной вязкости при тем-

пературе отпуска выше 450 °С. Наибольшее различие наблюдается при температуре 600 °С.

Установлено, что между сталью, выплавленной на ГЖ и ОМШ по ударной вязкости, существует значимое различие.

Различие в ударной вязкости существует и при испытаниях при пониженных температурах (табл. 3).

Далее исследовали влияние качества исходной шихты на склонность стали 30ХГСА к отпускной хрупкости и

хладноломкости. По результатам определения ударной вязкости после отпуска в интервале температур 500...600 °С была определена температура максимальной хрупкости (рис. 2), которая соответствует значению 550 °С.

Таблица 3. Ударная вязкость стали 30ХГСА при низких температурах

Table 3. Impact strength of steel 30HGSA at low temperatures

a_H , Дж/см ²	Шихта	Температура испытаний, °С					
		+20	0	–20	–40	–60	–80
	ГЖ	195	154	121	86	59	56
	КШС	170	145	115	88	58	54
	ОМШ	1,0	118	89	53	48	51

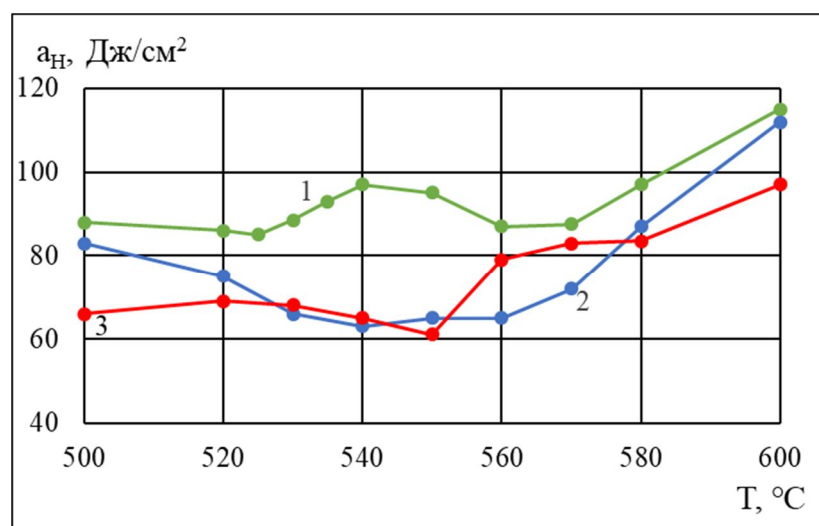


Рис. 2. Влияние шихты на отпускную хрупкость стали 30ХГСА: 1 – плавка на ГЖ; 2 – плавка на полупродукте КШС; 3 – плавка на ОМШ

Fig. 2. The effect of the charge on the release brittleness of steel 30HGSA: 1 – melting on GZH; 2 – melting on KSHS semi-product; 3 – melting on OMSH

При температуре охрупчивания 550 °С отпускали партию из 63 образцов в течение 50 часов (по 21 образцу от плавки) с последующим медленным охлаждением с печью ($\tau = 3,5$ часа). Испытания обработанных образцов (по

3 образца от плавки) проводили при температурах –80...+20 °С (через 20 °С).

В качестве охлаждающей жидкости применяли смесь сухого льда с бензином. Измерение температуры проводили с точностью ± 1 °С. Выдержка образцов в термостате при заданной темпера-

туре не менее 15 минут; время установки замороженного образца в копер с момента извлечения из ванны до удара маятника 2...3 секунды.

Результаты испытаний на ударную вязкость представлены на рис. 3. В ка-

честве статистической обработки применяли обработку результатов измерений методом двойного линейного сглаживания по трем точкам [6]. Схема обработки имеет следующий вид:

$\begin{aligned} \overline{y}_1 &= \frac{1}{6}(5y_1 + 2y_2 - y_3) \\ \overline{y}_2 &= \frac{1}{3}(y_1 + y_2 + y_3) \\ \overline{y}_3 &= \frac{1}{3}(y_2 + y_3 + y_4) \\ &\text{и т. д.} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \overline{y}_1 &= \frac{1}{6}(5\overline{y}_1 + 2\overline{y}_2 - \overline{y}_3) \\ \overline{y}_2 &= \frac{1}{3}(\overline{y}_1 + \overline{y}_2 + \overline{y}_3) \\ \overline{y}_3 &= \frac{1}{3}(\overline{y}_2 + \overline{y}_3 + \overline{y}_4) \\ &\text{и т. д.} \end{aligned}$
---	--

$$\overline{y}_n = \frac{1}{6}(-y_{n-2} + 2y_{n-1} + 5y_n) \quad \overline{y}_n = \frac{1}{6}(-\overline{y}_{n-2} + 2\overline{y}_{n-1} + 5\overline{y}_n).$$

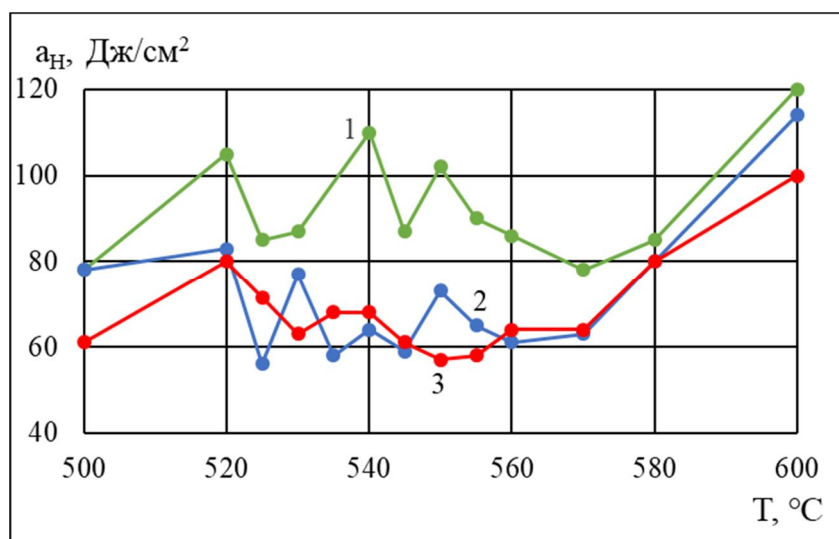


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска стали 30ХГСА:
1 – плавка на ГЖ; 2 – плавка на полупродукте КШС; 3 – плавка на ОМШ

Fig. 3. Dependence of the impact strength on the tempering temperature of steel 30HGSA:
1 – melting on GZH; 2 – melting on Kshs semi-product; 3 – melting on OMSH

Окончательная зависимость ударной вязкости от температуры отпуска и чистоты шихты имеет вид кривых, представленных на рис. 3 (кроме плавки на полупродукте КШС), и напоминает зависимости, полученные автором работы [10]. Абсолютные значения ударной вязкости стали 30ХГСА, выплав-

ленной на ГЖ, при всех температурах отпуска в интервале 500...600 °C выше, чем в плавках на ОМШ и на первородной шихте КШС. Сталь, выплавленная на шихте КШС, по содержанию микропримесей, как известно из литературы, занимает промежуточное положение между плавками на ОМШ и ГЖ [3, 10].

Величины a_H после отпуска при температурах 500, 520, 580 и 600 °С у плавки КШС также являются промежуточными между величинами ударной вязкости в плавках на ОМШ и ГЖ после отпуска при тех же температурах. Однако в интервале температур 530...570 °С кривая зависимости $a_H = f(T_{отп})$ для плавки на полупродукте КШС почти совпадает с подобной кривой у плавки на ОМШ.

Сравнение микроструктур стали 30ХГСА, выплавленной на различной шихте, после закалки и отпуска при температуре хрупкости 550 °С показало, что разница в структуре плавков отсутствует.

Из литературы, известно, что отпускная хрупкость связана с процессами, протекающими на границах зерен [11]. Плавка на ОМШ содержит примесей цветных металлов Cu, Sb, As, Sn в 3...10 раз больше, чем плавка на ГЖ и КШС, а плавка на ГЖ и КШС различается по их количеству в 2...3 раза. Можно предположить взаимное влияние легирующих элементов, примесей и микропримесей. Сила этого взаимного влияния сказывается определенным образом на скорости диффузии примесей по границам зерен и образовании сегрегаций. Согласно теории тройных равновесных сегрегаций, если есть взаимодействие между легирующими элементами и примесями, то один из этих элементов усиливает сегрегацию другого на границе. Так хром, присутствующий

в сплаве, способствует выделению Ni и Sb по границам зерен [7]. Кроме этого, сталь 30ХГСА выплавлена на различной шихте, что может влиять на строение границ зерен [2, 7]. С различием в строении границ зерен связана и различная величина энергии границ, а, следовательно, и различное количество сегрегирующих примесей [12, 8].

По данным работы [10] максимум кривой распределения энергии границ зерен γ_B/γ_S стали 30ХГСА, выплавленной на ОМШ, соответствует меньшему значению, чем в плавках на полупродукте КШС и ГЖ. Это хорошо согласуется с повышенным содержанием в плавке на ОМШ примесей Cu, Ni, Pb, As, Sn, Sb, которые являются поверхностно-активными и должны понижать энергию границ зерен по сравнению с плавками на КШС и ГЖ. Исследования относительной свободной энергии границ зерен аустенита являются косвенным доказательством того, что бывшие границы зерен аустенита в плавке на ОМШ обогащены большим количеством примесей Cu, Sb, As, Sn и др. по сравнению с плавками на ГЖ и КШС. Поэтому в первой плавке наблюдается большее значение ударной вязкости.

Исследование хладноломкости стали 30ХГСА (рис. 4) показало, что во всех плавках с понижением температуры испытаний наблюдается монотонное понижение a_H . Условный порог хладноломкости для стали 30ХГСА определяется при $a_H = 30 \text{ Дж/см}^2$.

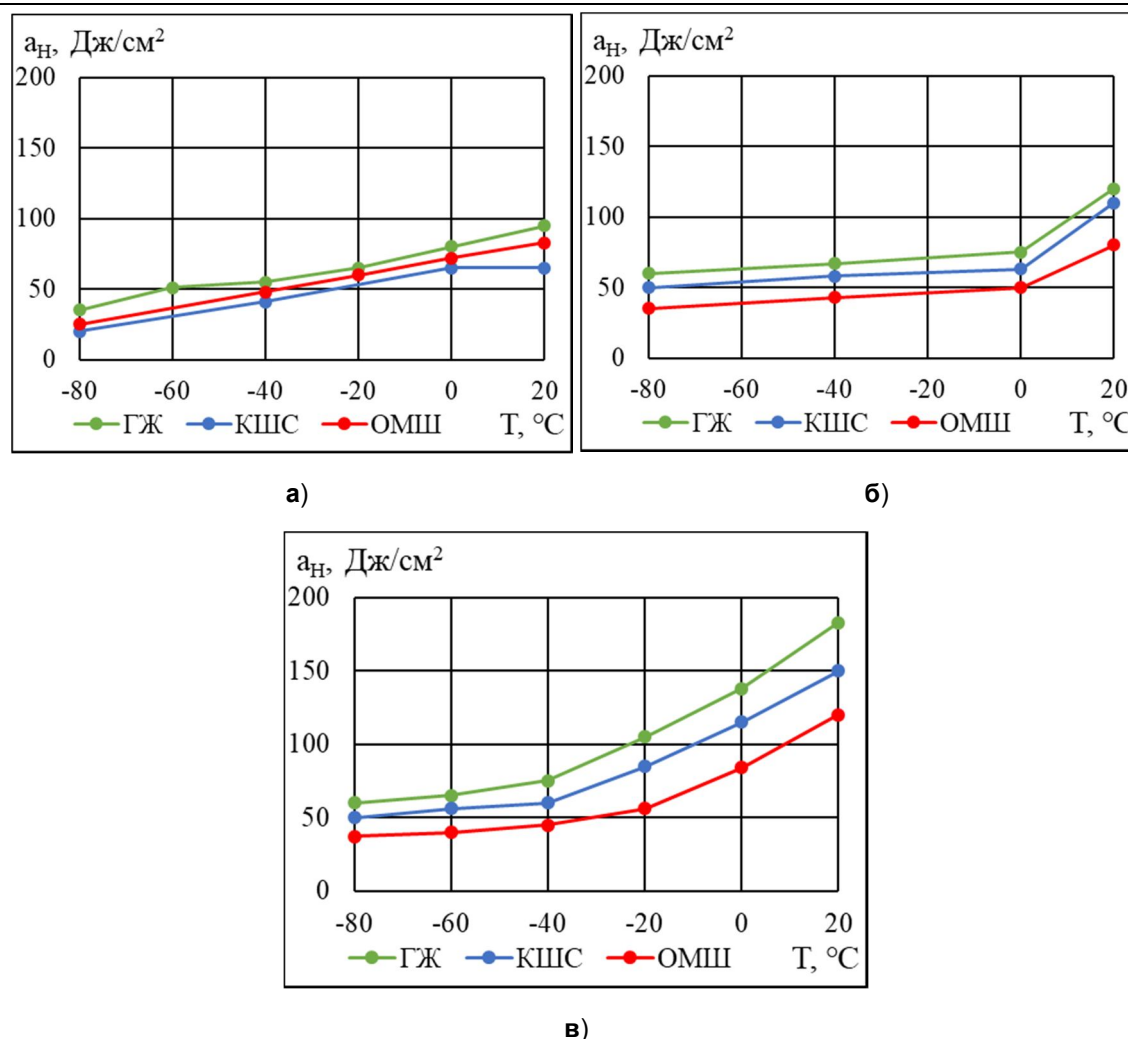


Рис. 4. Влияние шихты стали 30ХГСА на хладноломкость после: **а** – горячей деформации; **б** – охрупчивающего отпуска; **в** – после улучшения

Fig. 4. Effect of 30hgsa steel charge on cold breakage after: **а** – hot deformation; **б** – embrittling release; **в** – after improvement

Во всех трех состояниях наибольшее значение a_H наблюдается у плавки на ГЖ, а наименьшее – в плавке на ОМШ (в состоянии охрупчивания и улучшения, или в плавке на КШС (после горячей деформации). В состоянии стали после горячей деформации для плавки на ГЖ условный порог хладноломкости составляет -80 °C, в плавках на ОМШ и КШС – $(-65$ °C). Сдвиг в значениях температуры порога хладноломкости небольшой.

Наибольший уровень a_H наблюдается в состоянии после улучшения и охлаждения на воздухе с температуры 600 °C. Нижний порог хладноломкости для всех плавков лежит при температуре -80 °C.

При медленном охлаждении или во время выдержки при температуре 550 °C происходит обогащение приграничных слоев Cu, Sb, Sn, As и др. Сталь охрупчивается за счет ослабления прочности межзеренных сцеплений и

понижения энергии границ. Поскольку во всех плавках количество фосфора приблизительно одинаково, то причину понижения ударной вязкости, вероятно, следует искать в большем количестве сегрегирующих по границам зерен поверхностно-активных примесей Cu, Sb, Sn, As и др.

Фрактографические исследования поверхности излома, проведенные на электронном микроскопе Stereoskan-180, позволили изучить особенности тонкой структуры изломов. Высокая локальность электронного микроскопа делает возможным определение характера разрушения сталей, у которых в области смешанного разрушения в пределах каждого зерна или комплекса зерен имеются участки излома с чашечным или ручьистым строением с димпами вязкого разрушения и фасетками транскристаллитного скола. Исследованию подвергалась только центральная часть излома, т. е. тот участок поверхности, где разрушение происходит в

условиях плоскодеформированного состояния.

Появление в изломе первых участков с ручьистым узором свидетельствует о начале перехода металла из вязкого состояния в хрупкое, что соответствует верхнему порогу хладноломкости. По исчезновению участков с чашечным узором можно судить о конце переходной области, т. е. о нижнем пороге хладноломкости.

Изучение изломов образцов плавок после испытания при температуре +20 °С (рис. 5) показало, что характер излома центральной части смешанный, объединяющий элементы хрупкого и вязкого разрушения. Сравнивая изломы отдельных плавок (рис. 5), можно отметить, что наибольшая доля хрупкого межзеренного разрушения наблюдается в плавке на ОМШ, более грязной по примесям и микропримесям; меньше элементов хрупкого разрушения в плавке на первородной шихте КШС и еще меньше на ГЖ.

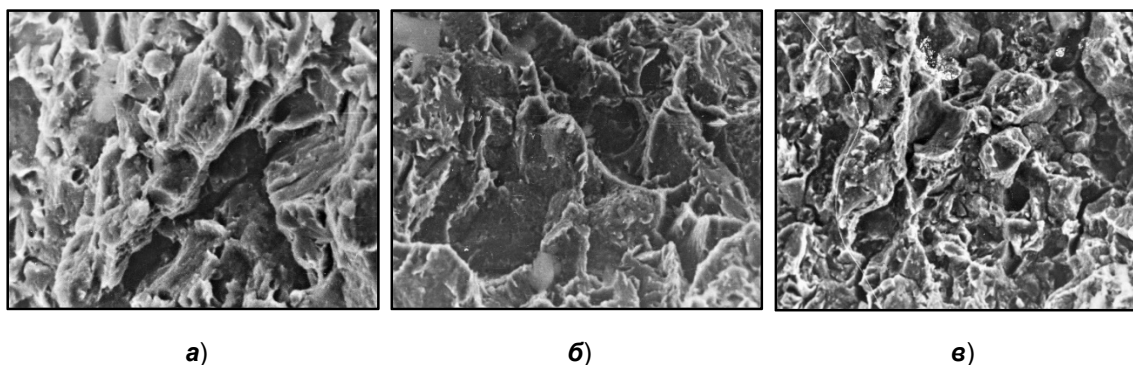


Рис. 5. Микрофрактограммы изломов стали 30ХГСА после охрупчивающего отпуска при 550 °С в течение 50 часов; температура испытаний (+20 °С), $\times 500$: **а** – плавка на ГЖ; **б** – плавка на полупродукте КШС; **в** – плавка на ОМШ

Fig. 5. Microfractograms of 30KhGSA steel fractures after embrittling tempering at 550 °C for 50 hours; test temperature (+20 °C), $\times 500$: **a** – melting on GJ; **b** – melting on Kshs semi-product; **v** – melting on OMSH

По виду излома можно сделать вывод, что верхний порог хладноломкости лежит при более высокой температуре. С понижением температуры испытания тонкое строение излома изменяется, увеличивается доля хрупкого межзеренного разрушения в изломах всех

плавков, особенно это заметно в плавке на ОМШ. На микрофрактограммах стали 30ХГСА после охрупчивающего отпуска при температуре испытания ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) четко видны трещины по границам зерен во всех исследуемых плавках (рис. 6).

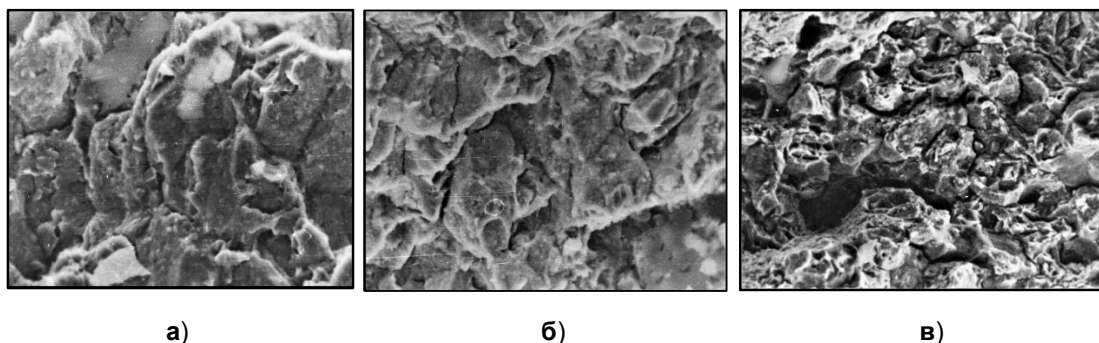


Рис. 6. Микрофрактограммы изломов стали 30ХГСА после охрупчивающего отпуска при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 50 часов; температура испытаний ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\times 500$: **а** – плавка на ГЖ; **б** – плавка на полупродукте КШС; **в** – плавка на ОМШ

Fig. 6. Microfractograms of 30KhGSA steel fractures after embrittlement tempering at $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 50 hours; test temperature ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\times 500$: **a** – melting on GJ; **b** – melting on Kshs semi-product; **v** – melting on OMSH

Таким образом, переход от чашечного излома к хрупкому межзеренному разрушению еще раз подтверждает, что слабым местом в процессе разрушения после охрупчивающего отпуска являются границы зерен, обогащенные примесями и микропримесями.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [13-34].

Выводы

1. Показано, что характеристики механических свойств (σ_B , $\sigma_{0.2}$, ψ , δ , a_H) у образцов различных плавков стали 30ХГСА уменьшаются с повышением

температуры. Заметное разупрочнение стали 30ХГСА различных плавков начинается с температуры отпуска равной $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. По пределу прочности, относительному удлинению и твердости различий в плавках не наблюдается. Сталь, выплавленная на губчатом железе при температуре отпуска $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеет более высокие характеристики пластичности (ψ) и ударной вязкости (a_H).

2. Определена температура максимальной отпускной хрупкости для стали, выплавленной на обычной металлизированной шихте, которая равна $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Установлено, что сталь 30ХГСА, выплавленная на чистой первородной шихте (губчатое железо), имеет мень-

шую склонность к отпускной хрупкости, чем сталь, выплавленная на обычной шихте. Величина ударной вязкости для этой плавки стали выше, чем у стали обычной выплавки во всем интервале температур отпуска.

3. Установлено, что порог хладноломкости стали 30ХГСА ниже у более чистых плавов на губчатом железе и полупродукте КШС, а величина ударной вязкости при низких температурах выше, чем в плавке на обычной металлизированной шихте.

Список литературы

1. Влияние качества шихты на чувствительность стали 30ХГСА к водородному растрескиванию / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 37-48.
2. Гуляев А.П. Чистая сталь. М.: Металлургия, 1975. 184 с.
3. Мартынов О.В., Свободов А.Н., Лещенко И.П. Влияние первородной шихты на свойства конструкционных сталей // Сталь. 1971. № 12.
4. Марченко В.Н., Литвиненко Д.А., Моргалев Б.Н. Свойства стали 18Х2Н4ВА, выплавленной на первородной и обычной шихте // Сталь. 1977. № 7.
5. Физико-механические характеристики стали У10А разных способов выплавки / В.Т. Терещенко, Н.Н. Сергеев, Е.В. Тинькова, Ю.Т. Дадешкелиани // Сталь. 1987. № 2. С. 86-90.
6. Теория прогнозирования и принятия решений / С.А. Саркисян, В.И. Каспин, В.А. Лисичкин, Э.С. Минаев, Г.С. Пасечник.; под. ред. С.А. Саркисяна. М.: Высшая школа, 1977. 351 с.
7. Улучшение качества и повышение свойств стали массового назначения за счет прогрессивных способов выплавки и обработки: отчет о НИР / Тульский политехнический институт; НПО «Тулачермет»; рук: О.В. Степанова (раздел 1); Э.Г. Титенский (раздел 2); И.Я. Рязанцев (раздел 3). Тула, 1980. 147 с. Исполн.: В.С. Агеев, Н.Н. Сергеев, Н.И. Банина, Л.П. Горелова, Г.Ф. Лапшин. № ГР 77050898.
8. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 430 с.
9. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.
10. Кожевников И.Ю. Бескоксовая металлургия. М.: Металлургия, 1970. 336 с.
11. Утевский Л.М., Гликман Е.Э., Карак Г.С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. М.: Металлургия, 1987. 222 с.

12. Влияние качества шихты и температуры отжига на формирование зеренной структуры аустенита в стали 30ХГСА / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 2. С. 8-26.

13. Влияние условий отпуска на механические и коррозионные свойства стали 23Х2Г2Т / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2018. № 2(45). С. 128-135.

14. Влияние химического состава стали 23Х2Г2Т на стойкость против коррозионного растрескивания / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.Н. Чуканов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 409-442.

15. Влияние уровня растягивающих напряжений на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 6-19.

16. Применение технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3(78). С. 67-83. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83>.

17. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 2(77). С. 52-63.

18. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 235 с.

19. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

20. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

21. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. I (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 3. С. 27-33.

22. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч.II (обзор) / Сергеев Н.Н., А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 4. С. 20-29.

23. Формирование пластических зон около сферической полости в упрочненных низкоуглеродистых сталях в условиях водородной стресс-коррозии / Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, А.Н. Чуканов, А.Г. Колмаков, А.А. Яковенко, А.Н. Сергеев, И.М. Леонтьев, Д.М. Хонелидзе, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2017. № 12. С. 18-25.

24. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // Технология металлов. 2015. № 11. С. 17-29.

25. Влияние разнотермичности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2014. № 7. С. 23-26.

26. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

27. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

28. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

29. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95.

30. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

31. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь. 2017. № 6. С. 26-39.

32. Современные проблемы технических наук / Н.Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, Ю. С. Дорохин, П. Н. Медведев. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2016. 120 с.

33. О состоянии предпревращения металлов и сплавов: монография / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 245 с.

34. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 114 с.

References

1. Sergeev N.N., Tikhonova I.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Ageev E.V., Gvozdev A. E., Klementev D. S. Vliyanie kachestva shikhty na chuvstvitel'nost' stali 30KhGSA k vodorodnomu rastreskivaniyu [Influence of charge quality on the sensitivity of 30KhGSA steel to hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 37-48 (In Russ.).
2. Gulyaev A. P. *Chistaya stal'* [Pure steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975, 184 p. (In Russ.).
3. Martynov O. V., Svobodov A. N., Leshchenko I. P. Vliyanie pervorodnoi shikhty na svoistva konstruksionnykh stalei [Influence of primordial charge on the properties of structural steels]. *Stal' = Steel*, 1971, no. 12 (In Russ.).
4. Marchenko V. N., Litvinenko D. A., Morgalev B. N. Svoistva stali 18Kh2N4VA, vyplassennoi na pervorodnoi i obychnoi shikhte [Properties of 18x2h4va steel, smelted on original and conventional charge]. *Stal' = Steel*, 1977, no. 7 (In Russ.).
5. Tereshchenko V. T., Sergeev N. N., Tinkova E. V., Dadeshkeliani Yu. T. Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki stali U10A raznykh sposobov vyplavki [Physical and mechanical characteristics of steel U10A of different methods of smelting]. *Stal' = Steel*, 1987, no. 2, pp. 86-90 (In Russ.).
6. Sarkisyan S. A., Kaspin V. I., Lisichkin V. A., Minaev E. S., Pasechnik G. S. *Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya reshenii* [Theory of forecasting and decision-making], ed. by S. A. Sarkisyan, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 351 p. (In Russ.).
7. Uluchshenie kachestva i povyshenie svoistv stali massovogo naznacheniya za schet progressivnykh sposobov vyplavki i obrabotki. Otchet o NIR [Improving the quality and improving the properties of mass-purpose steel due to progressive methods of smelting and processing. Report on research]. Tula, 1980, 147 p. GR no. 77050898 (In Russ.).
8. Sergeev N. N., Sergeev A. N. *Mekhanicheskie svoistva i vnutrennee trenie vysokoprechnykh stalei v korrozionnykh sredakh* [Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosive environments]. Tula, 2018, 430 p. (In Russ.).
9. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sapozhnikov S. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Prinyatie reshenii po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produktsii [Decisions on Statistical Models in Quality Control of Products]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 5(74), pp. 78-92 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.
10. Kozhevnikov I. Yu. *Beskoksovaya metallurgiya* [Beskoksovaya metallurgy], Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 336 p. (In Russ.).

11. Utevsky L. M., Glikman E. E., Karak G. S. *Obratimaya otpusknaya khrupkost' stali i splavov zheleza* [Reversible release brittleness of steel and iron alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 222 p. (In Russ.).

12. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Minaev I.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementev D. S. Vliyanie kachestva shikhty i temperatury otzhiga na formirovanie zerennoi struktury austenita v stali 30KhGSA [Influence of Quality of the Charge and the Antibreating Temperature on the Formation of the Granular Structure of Austenitis in Steel 30KhGSA]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 8-26 (In Russ.).

13. Sergeev N. N., Izvolsky V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E. Vliyanie uslovii otpuska na mekhanicheskie i korrozionnye svoistva stali 23Kh2G2T [Influence of tempering conditions on the mechanical and corrosion properties of steel 23X2G2T]. *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov*, 2018, no. 2(45), pp. 128-135 (In Russ.).

14. Sergeev N. N., Izvolsky V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Pantyukhin O. V. Vliyanie khimicheskogo sostava stali 23Kh2G2T na stoikost' protiv korrozionnogo rastreskivaniya [Influence of the chemical composition of steel 23X2G2T on the resistance against corrosion cracking]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Science*, 2018, is. 9, pp. 409-442 (In Russ.).

15. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Tikhonova I. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Vliyanie urovnya rastyagivayushchikh napryazhenii na dlitel'nuyu prochnost' armaturnykh stalei v vodorodsoderzhashchikh sredakh [Influence of the level of tensile stresses on the long-term strength of reinforcing steels in hydrogen-containing media]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 6-19 (In Russ.).

16. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Klementev D. S. Primenenie tekhnologii izgotovleniya «korkovym» sposobom formoobrazuyushchikh vstavok dlya lit'ya pod davleniem mednykh splavov [Application of technology for manufacturing "Corky" forming inserts for injection molding of copper alloys]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 3(78), pp. 67-83 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83).

17. Sergeev N. N., Izvolsky V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E. V., Klementev D. S. Primenenie tekhnologii izgotovleniya «korkovym» sposobom formoobra-zuyushchikh vstavok dlya lit'ya pod davleniem mednykh splavov [The Influence of Microstructural Factors and Heat Treatment on The Corrosion Resistance of Reinforcing

Steel Class A 600]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 52-63 (In Russ.).

18. Shorshorov M. H., Gvozdev A. E., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Breki A.D., Sergeev N. N., Kuzovleva O. V., Starikov N. E., Maliy D. V. *Razrabotka progressivnykh tekhnologii polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozitsionnykh nanomaterialov* [Development of progressive technologies for obtaining and processing metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. Tula, 2016, 235 p. (In Russ.).

19. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Provotorov D. A. Vliyanie deformatsionnoi povrezhdaemosti na formirovanie mekhanicheskikh svoystv malouglerodistykh staley [Influence of deformation damage on the formation of mechanical properties of low-carbon steels]. *Proizvodstvo prokata = Manufacture of hire*, 2015, no. 12, pp. 9-13 (In Russ.).

20. Baranov V. P., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Sergeev N. N., Chukanov A. N. Mnogourovnevnyi podkhod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnykh konstruktsionnykh staley pod deistviem vodoroda [Multilevel approach to the problem of delayed destruction of high-strength structural steels under the action of hydrogen]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 7, pp. 11-22 (In Russ.).

21. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov. Ch.I (obzor) [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Part I (review)]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 3, pp. 27-33 (In Russ.).

22. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov. Ch.II (obzor) [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Part II (review)]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 4, pp. 20-29 (In Russ.).

23. Sergeev N. N., Tereshin V. A., Chukanov A. N., Kolmakov A. G., Yakovenko A. A., Sergeev A. N., Leontiev I. M., Honelidze D. M., Gvozdev A. E. Formirovanie plasticheskikh zon okolo sfericheskoi polosti v uprochnennykh nizkouglerodistykh stalyakh v usloviyakh vodorodnoi stress-korrozii [Formation of plastic zones near a spherical cavity in hardened low-carbon steels under conditions of hydrogen stress corrosion]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 12, pp. 18-25 (In Russ.).

24. Gvozdev A. E., Zhuravlev G. M., Kolmakov A. G. Formirovanie mekhanicheskikh svoystv uglerodistykh staley v protsessakh vytyazhki s utoneniem [Formation of mechanical properties of carbon steels in the processes of drawing with thinning]. *Tekhnologiya metallov = Metal Technology*, 2015, no. 11, pp. 17-29 (In Russ.).

25. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., I Minaev. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V. Vliyanie raznozernistosti austenita na kinetiku perlitnogo prevrashcheniya v malo- i sredneuglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [Influence of different-grained

austenite on the kinetics of perlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2014, no. 7, pp. 23-26 (In Russ.).

26. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Kolmakov A. G. Rol' protsessa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotorykh fazovykh perekhodov vtorogo roda [The role of the germ formation process in the development of some phase transitions of the second kind]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

27. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Organic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

28. Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Tikhonova I. V., Kutepov S. N., Kuzovlev O. V., Ageev E. V. Perspektivnye stali dlya kozhukhov domennykh agregatov [Promising steels for blast furnace casings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, vol. 7, no. 2(23), pp. 6-15 (In Russ.).

29. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Diffuziya vodoroda v svarnykh soedineniyakh konstruktsionnykh stalei [Diffusion of Hydrogen in Welded Joints of Structural Steels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 6(75), pp. 85-95 (In Russ.).

30. Gvozdev A. E., Sergeyev N. N., Minayev I. V., Tikhonova I. V., Sergeyev A. N., Khonelidze D. M., Maliy D. V., Golyshev I. V., Kolmakov A. G., Provotorov D. A. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. *Organic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

31. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Cheglov A. E., Sergeev N. N., Gubanov O. M. Variant opredeleniya maksimal'nogo plasticheskogo uprochneniya v instrumental'nykh stal'yakh [Option for determining the maximum plastic hardening in tool steels]. *Stal' = Steel*, 2017, no. 6, pp. 26-39 (In Russ.).

32. Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Dorokhin Yu. S., Medvedev P. N. *Sovremennye problemy tekhnicheskikh nauk* [Modern problems of technical Sciences]. Tula, 2016, 120 p. (In Russ.).

33. Kuzovleva O. V., Gvozdev A. E., Tikhonova I. V., Sergeev N. N., Breki A. D., Starikov N. E., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Maliy D. V., Titova Yu. E., Aleksandrov S. E., Krylov N. A. *O sostoyanii predprevrashcheniya metallov i splavov* [On the state of pre-conversion of metals and alloys]. Tula, 2016, 245 p. (In Russ.).

34. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E. *Plasticheskaya dilatatsiya i deformatsionnaya povrezhdaemost' metallov i splavov* [Plastic dilatancy and deformational damage of metals and alloys]. Tula, 2014, 114 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергеев Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Nikolay N. Sergeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Сергеев Александр Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: ansergueev@mail.ru

Aleksandr N. Sergeev, Dr. of Sci. (Pedagogical), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: ansergueev@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Cand of Sci. (Pedagogical), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Тихонова Ирина Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Физика металлов и металловедение», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Российская Федерация, e-mail: TichonovaIV@mail.ru

Irina V. Tikhonova, Cand of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Metal Physics and Metal Science Department, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: TichonovaIV@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Evgeniy V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Клементьев Денис Сергеевич, магистрант, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Denis S. Klement'yev, Undergraduate, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: denis.klementev.93@mail.ru