

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-56-76>

Влияние способа получения высокоуглеродистой инструментальной стали У10А на физико-механические, технологические и коррозионные свойства

Н. Н. Сергеев¹, А. Н. Сергеев¹, С. Н. Кутепов¹, И. В. Минаев²,
А. Е. Гвоздев¹, Е. В. Агеев³ ✉, Д. С. Клементьев¹, О.В. Кругляков³

¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация

³ ООО НПП «Телар»
Городской переулок, 39, г. Тула, 300026, Российская Федерация

³ 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, технологических и коррозионных свойств высокоуглеродистой инструментальной стали У10А.

Методы. В качестве объекта исследования была выбрана высокоуглеродистая инструментальная сталь У10А, выплавленная в ПАО «Тулачермет» с использованием металлизированных окатышей губчатого железа, обычного металлического лома и заготовки, полученной методом кипящего шлакового слоя. Сталь выплавляли в трехтонной дуговой печи, подвергали внепечной вакуумной обработке в ковше, разливали на заготовки сечением 280×320 мм и замедленно охлаждали вместе с печью. Затем полученные заготовки проковывали на квадрат размерами 150×150 мм (для изготовления штампов) и 40×40 мм (для образцов) с охлаждением в песке и последующим отжигом. Экспериментальное исследование химического состава плавок стали У10А определяли методом фотоэлектрического спектрального анализа с помощью атомно-эмиссионного спектрометра «SA 2000» по ГОСТ 18895-97.

Результаты. Установлено, что использование чистой первородной шихты положительно сказывается на свойствах выплавленного металла. Сталь У10А, выплавленная на первородной шихте, по прочностным характеристикам не уступает стали на ОМШ, превосходя последнюю по пластическим свойствам и особенно по ударной вязкости. Показано, что сталь, выплавленная на первородной шихте, отличается более низким содержанием микропримесей, обладает меньшей устойчивостью к распаду аустенита и более низкой прокаливаемостью. Выявлено, что из-за меньшей устойчивости аустенита, сталь, выплавленная на первородной шихте, должна иметь более высокую критическую скорость закалки, что следует учитывать при выборе режимов термообработки. Установлено, что длительная прочность стали У10А в среде, вызывающей водородное растрескивание, во многом зависит от режимов термической обработки и от чистоты стали. Более чистая сталь обладает большей стойкостью против водородного растрескивания и, следовательно, большей долговечностью в процессе эксплуатации.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов.

© Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Минаев И. В., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В., Клементьев Д. С., Кругляков О.В., 2019

Ключевые слова: инструментальные стали; хладноломкость; примеси; аустенит; первородная шихта; прокаливаемость; термообработка.

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 способа получения высокоуглеродистой инструментальной стали У10А на физико-механические, технологические и коррозионные свойства / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, И. В. Минаев, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев, О.В. Кругляков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 56-76. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-56-76>.

Поступила в редакцию 27.09.2019

Подписана в печать 12.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Influence of the Method of Producing High-Carbon Tool Steel U10A on the Physical, Mechanical, Technological and Corrosion Properties

Nikolay N. Sergeev ¹, Aleksandr N. Sergeev ¹, Sergey N. Kutepov ¹, Igor V. Minaev ³, Aleksandr E. Gvozdev ¹, Evgeniy V. Ageev ³ ✉, Denis S. Klement'yev ¹, Oleg V. Kruglyakov ³

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

² LLC NPP Telar
39 Gorodskoy str., Tula 300026, 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 study of the effect of the quality of the original charge on the complex of physical, mechanical, technological and corrosion properties of high-carbon tool steel U10A.

Methods. High-carbon tool steel U10A, smelted at Tulachermet PJSC using metallized sponge iron pellets, scrap metal and a billet obtained by the fluidized slag blanket, has been chosen as the object of study. Steel was smelted in a three-ton arc furnace, subjected to out-of-furnace vacuum treatment in a ladle, cast into billets with a cross section of 280 × 320 mm and cooled slowly together with the furnace. Then, the obtained blanks were forged into a square of 150 × 150 mm (for making dies) and 40 × 40 mm (for samples) with cooling in sand and subsequent annealing. The experimental study of the chemical composition of U10A steel melts was determined by the method of photoelectric spectral analysis using an atomic emission spectrometer SA 2000 according to GOST 18895-97.

Results. It has been found that the use of pure original charge has a positive effect on the properties of the melted metal. Steel U10A, smelted on the original charge, is not inferior in strength characteristics to steel on OMSH, surpassing the latter in terms of its plastic properties and especially in toughness. It is shown that steel smelted on the original charge is characterized by a lower content of micro-impurities, has less resistance to austenite decomposition and lower hardenability. It is revealed that, due to the lower stability of austenite, steel melted on the original charge must have a higher critical hardening rate, which should be taken into account when choosing heat treatment modes. It is established that the long-term strength of U10A steel in a medium that causes hydrogen

cracking, largely depends on the heat treatment conditions and on the purity of the steel. Cleaner steel has a higher resistance to hydrogen cracking and, therefore, greater durability during operation.

Conclusion. The results can be used to create resource-saving processes for processing metal alloys and composite materials.

Keywords: tool steel; cold brittleness; impurities; austenite; original charge; hardenability; heat treatment.

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

Funding: Work performed under the project No. 11.6682.2017/8.9.

For citation: Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutevov S. N., Minaev I. V., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klement'yev D. S., Kruglyakov O. V. Influence of the Method of Producing High-Carbon Tool Steel U10A on the Physical, Mechanical, Technological and Corrosion Properties. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 56-76 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-6-56-76](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-56-76).

Received 27.09.2019

Accepted 12.11.2019

Published 23.12.2019

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 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, технологических и коррозионных свойств высокоуглеродистой инструментальной стали У10А.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана высокоуглеродистая инструментальная сталь У10А, выплавленная в ПАО «Тулачермет» с использованием металлизированных окатышей губчатого железа (ГЖ), обычного металлического лома (ОМШ) и заготовки, полученной методом кипящего шлакового слоя (КШС).

Сталь выплавляли в трехтонной дуговой печи, подвергали внепечной вакуумной обработке в ковше, разливали на УНРС на заготовки сечением 280×320 мм и замедленно охлаждали вместе с печью. Затем полученные заготовки проковывали на квадрат размерами 150×150 мм (для изготовления штампов) и 40×40 мм (для образцов) с охлаждением в песке и последующим отжигом. Химический состав исследуемых плавок стали приведен в табл. 1.

Экспериментальное исследование химического состава плавок стали У10А определяли методом фотоэлектрическо-

го спектрального анализа с помощью атомно-эмиссионного спектрометра «SA 2000» по ГОСТ 18895-97.

В литом материале определяли загрязненность неметаллическими включениями по ГОСТ 1778-70 методом П. Для правильного выбора режимов термической обработки определяли склонность стали к росту зерна, устойчивость к распаду аустенита и прокаливаемость, чтобы выявить влияние первородной шихты на технологические свойства металла.

Склонность к росту зерна аустенита изучали на образцах Ø8 мм и $l = 15$ мм, которые подвергали вакуумному травлению в диапазоне температур 780...1200°C в течение одного часа с последующим ускоренным охлаждением, чтобы предотвратить межфазное травление зерен. Величину зерна определяли при сто-кратном увеличении по ГОСТ 5639-82 путем просмотра всей площади шлифа и сравнения видимых на шлифе зерен с эталонными изображениями (шкалы № 1-3).

Таблица 1. Химический состав исследуемых плавок стали У10А

Table 1. The chemical composition of the studied melts of steel U10A

№ плавки	Шихта	Внепечная обработка с вакуумом	Химический состав, %							
			C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr
1	ОМШ	с обработкой	1,00	0,22	0,26	0,016	0,011	0,10	0,10	0,03
2	ОМШ	без обработки	1,01	0,21	0,26	0,015	0,015	0,13	0,12	0,09
3	ГЖ	с обработкой	0,97	0,18	0,23	0,012	0,014	0,09	0,04	0,11
4	ГЖ	с обработкой	0,96	0,15	0,24	0,012	0,008	0,03	0,02	0,09
5	КШС	с обработкой	0,98	0,17	0,30	0,028	0,025	0,03	0,04	0,04
6	КШС	с обработкой	1,00	0,18	0,24	0,027	0,025	0,05	0,09	0,10

Каждый шлиф просматривали по четырем диаметрам (20 полей зрения).

Прокаливаемость определяли методом торцевой пробы по ГОСТ 5657-69 и методом объемной закалки на образцах стали У10А, выплавленной на ГЖ и ОМШ, прошедшей после кристаллизации горячую деформацию. В первом случае выбирали температуры закалки 780 и 850 °С. Для объемной закалки использовали образцы квадратного (20×20 мм) и круглого Ø20 мм сечения; температура закалки составляла 850 °С.

Исследование устойчивости аустенита к распаду при охлаждении проводили на вакуумном dilatометре «Formastor». Для этого образцы нагревали до 850 °С, выдерживали 15 мин и охлаждали вместе с печью. Температуру нагрева выбрали выше критической точки A_{cm} на 50 °С с тем, чтобы растворился избыточный вторичный цементит. Для исключения влияния размера зерна аустенита на устойчивость его к распаду при охлаждении получали в разных плавках стали У10А зерно аустенита одинакового размера.

Металлографические исследования проводили на металломикроскопе МИМ-8. Структуру металла изучали в литом состоянии послековки и термической обработки. Определение дисперсности перлита выполняли по ГОСТ 8233-56.

Термообработанные образцы проходили механические испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84), ударный изгиб при комнатной и пониженной

температурах (ГОСТ 9454-78, образцы 1 типа 1, копер МК30А).

Испытания на длительную прочность в водородсодержащих средах проводили при комнатной температуре на образцах Ø12 мм и $l=150$ мм. В качестве агрессивной среды, вызывающей наводороживание, использовали водный раствор серной кислоты с добавлением роданистого аммония (4,5% H_2SO_4 + 2,5% NH_4CNS). Наводороживание образцов осуществляли методом катодной поляризации при плотности тока $D_k = 60$ А/м². Стойкость стали к ВР оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 4...6 образцов на каждую точку графика.

Результаты и их обсуждение

Проведенный фотоэлектрический спектральный анализ химсостава исследуемых плавов стали У10А показал, что все плавки имеют близкий химический состав по основным элементам (см. табл. 1), но имеется значительное различие в содержании вредных примесей и примесей цветных металлов. Наиболее чистыми по содержанию S, P, Cu и Ni являются плавки ГЖ. Содержание Cu и Ni в плавках на полупродукте КШС меньше, чем в плавках на ОМШ, однако полупродукт КШС имеет повышенное содержание S и P.

Результаты химического анализа плавов по микропримесям приведены в табл. 2, из анализа которой видно, что наименьшее количество примесей Sn, Sb и As содержится в стали У10А, вы-

плавленной с использованием ГЖ. Анализ проводили только для плавов на ОМШ и ГЖ, но основываясь на имеющихся в работе [2] данных можно ожи-

дать, что содержание микропримесей в плавках на шихте КШС значительно меньше, чем в плавках на ОМШ.

Таблица 2. Содержание микропримесей в стали У10А

Table 2. The content of micro impurities in steel U10A

№ плавки	Шихта	Содержание микропримесей, %				
		Pb	Sn	Zn	Sb	As
1	ОМШ	< 0,0001	0,06...0,010	0,0002	0,0014...0,002	0,01
2	ОМШ	0,0001	0,01	0,0002...0,006	0,0013...0,002	0,012...0,014
3	ГЖ	0,0001	0,0001	0,0002...0,0004	0,0001...0,0002	< 0,001
4	ГЖ	< 0,0001	< 0,0001	0,0002	0,0001	< 0,001

Далее проводили газовый анализ образцов, результаты которого приведены в табл. 3. По результатам газового анализа наиболее чистыми по азоту были плавки на ГЖ, а максимальное содержание азота наблюдали в плавках на полупродукте КШС. По количеству кислорода наиболее чистыми оказались плавки на КШС. Количество кислорода в плавках на ОМШ и особенно на ГЖ значительно меняется от плавки к плавке.

Исследование степени загрязненности литой стали неметаллическими вклю-

чениями показало, что наибольшей степенью загрязненности, главным образом сульфидными включениями, характеризовались плавки на полупродукте КШС (табл. 4), по-видимому, из-за повышенного содержания в них серы. Плавка № 1 на ОМШ занимает промежуточное положение по степени загрязненности. Во всех плавках наблюдается незначительная ориентация оксидных и сульфидных включений, под углом примерно 45°, что, по-видимому, обусловлено кристаллизацией в УНРС.

Таблица 3. Содержание газов в исследуемых плавках стали У10А

Table 3. The gas content in the studied steel melts U10A

№ плавки	Шихта	Содержание, %	
		Кислород	Азот
1	ОМШ	0,0075...0,0090	0,0086
2	ОМШ	0,008...0,010	0,006
3	ГЖ	0,005	0,0044
4	ГЖ	0,039...0,040	0,004...0,0052
5	КШС	0,0045	0,012
6	КШС	0,0046	0,02

Таблица 4. Количество неметаллических включений в стали У10А и их средний размер по данным металлографического анализа

Table 4. The number of non-metallic impurities in steel U10A and their average size according to metallographic analysis

№ плавки	Шихта	Объемная доля, %		Суммарный объем (Σ , %)	Количество включений на $1 \text{ см}^2 (N, \text{см}^{-2})$	Средний размер включений (\bar{d} , мкм)
		Оксидов	Сульфидов			
1	ОМШ	0,0105	0,0370	0,0475	6145	2,8
2	ОМШ	0,0106	0,0228	0,0334	3820	3,1
3	ГЖ	0,0100	0,0315	0,0415	3671	3,1
4	ГЖ	0,0130	0,0260	0,0390	3829	3,1
5	КШС	0,0156	0,0500	0,0656	8039	2,6
6	КШС	0,0185	0,0574	0,0759	7539	2,6

Для корковой зоны слитков характерно наличие мелких оксидов, в центре слитков наблюдали большое количество крупных сульфидов и оксисульфидов. Наибольшее количество мелких оксидов содержится в плавках на ОМШ и КШС в корковой зоне слитка. В этих же плавках наблюдали большой объемный процент сульфидов (табл. 4).

Структура горячеформированной стали, выплавленной на различных исходных шихтах, была одинаковой и представляла собой пластинчатый перлит с небольшим количеством вторичного цементита. Исследование склонности к росту аустенитных зерен показало, что при температурах вакуумного травления несколько выше $A_1 (t = 780^\circ\text{C})$ в структуре имеются мелкие аустенитные зерна с извилистыми незамкнутыми границами.

Структура была в основном однородной. При повышении температуры нагрева наблюдали увеличение размера зерна в образцах всех плавов (рис. 1).

В интервале температур $850 \dots 1050^\circ\text{C}$ проявлялась разнотернистость. Встречались зерна очень крупных размеров, особенно в плавке на ОМШ. В плавках на ГЖ наряду с зернами № 3...5 наблюдались зерна № 1...2. В плавках на полупродукте КШС структура была более равномерной, со спрямленными границами зерен, форма которых приближалась к полиэдрической.

При дальнейшем повышении температуры до 1200°C разнотернистость стали на полупродукте КШС увеличивалась (зерна № 2 присутствовали среди большого количества зерен № 4), но все же оставалась меньшей, чем в стали на ГЖ.

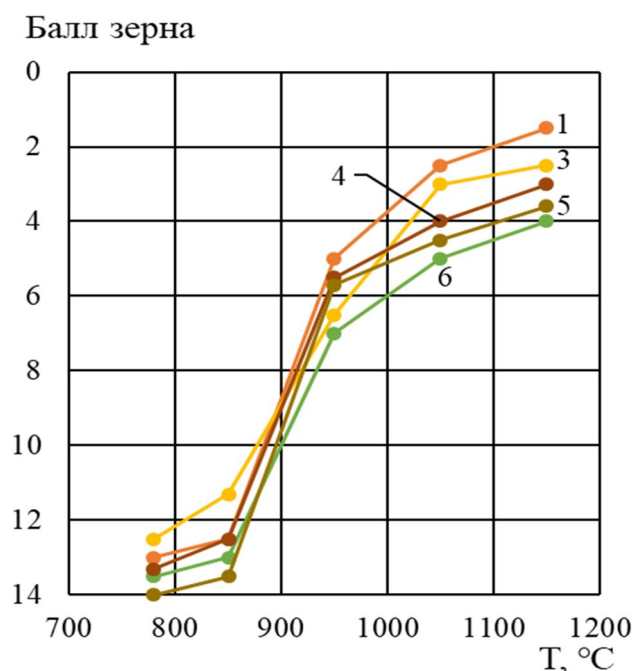


Рис. 1. Склонность к росту зерна аустенита в исследованных плавках стали У10А (у кривых приведены номера плавков)

Fig. 1. The tendency to grain growth of austenite in the studied melts of steel U10A (curves show the numbers of heats)

Анализ кинетических зависимостей роста зерен позволил выделить три периода их роста. Для первого периода (780...870 °C) характерно незначительное изменение размеров, различающееся для исследованных плавков, во втором периоде (850...950 °C) происходит интенсивный и неравномерный рост зерен с образованием разноструктурности и в третьем (выше 950 °C) – менее интенсивный рост зерен. В интервале температур 850...950 °C сталь на чистой шихте КШС обладает большей склонностью к росту зерна, что согласуется с данными работ [2, 5, 6] и может быть объяснено пониженным количеством поверхностно-активных примесей в этих плавках и механизмом рассыпания этих границ.

Выше 1000 °C механизм роста зерен контролируется миграцией границ; особенно сильное влияние могут оказывать избыточные фазы и неметаллические включения, присутствующие во всех плавках.

Исследование устойчивости аустенита к распаду при охлаждении показало, что температура начала и конца фазового превращения в исследованных плавках различалась.

Меньшей устойчивостью к распаду при охлаждении с печью обладает аустенит стали, выплавленной на полупродукте КШС ($t_{\text{НФП}} = 700$ °C), наиболее устойчив аустенит стали на ОМШ ($t_{\text{НФП}} = 680$ °C). Подобное различие в устойчивости аустенита можно объяснить наличием в плавках различного

содержания микропримесей Cu, Cr, Sb, Sn, As, которые, являясь поверхностно-активными, понижают энергию границ зерен и затрудняют распад аустенита.

Далее были выполнены исследования по установлению влияния вида шихты на закаливаемость и прокаливаемость стали У10А.

Закаливаемость стали в основном определяется содержанием в ней углерода и в меньшей степени зависит от содержания легирующих элементов и

других факторов [2], поэтому вид применяемой шихты не должен влиять на ее закаливаемость. Это подтверждается результатами измерения твердости стали У10А в закаленном состоянии (табл. 5).

Исследование прокаливаемости, выполненное методом торцевой закалки от температур 780 и 850 °С, позволило установить, что при одинаковой поверхностной твердости прокаливаемость плавов на ОМШ выше, чем для плавов ГЖ (рис. 2, а).

Таблица 5. Влияние вида шихты на закаливаемость стали У10А

Table 5. The effect of the type of charge on the hardenability of steel U10A

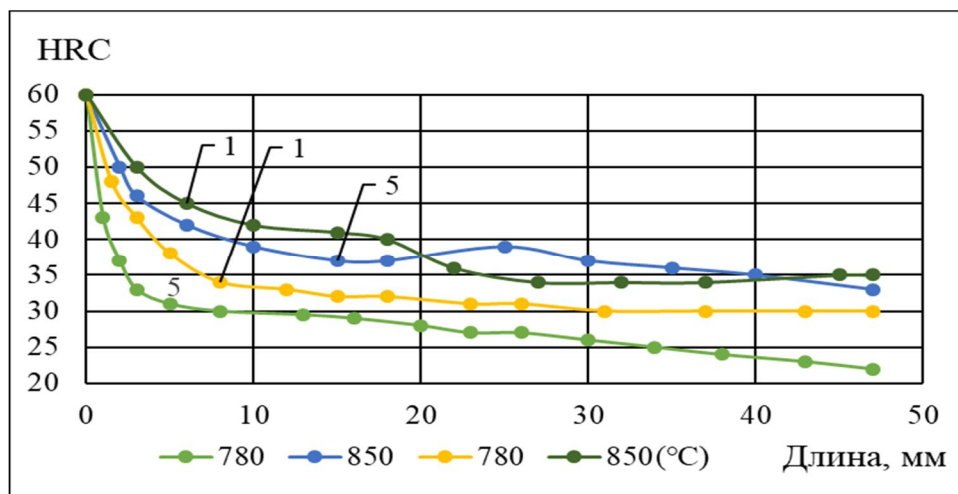
№ плавки	Шихта	Твердость стали, HRC		
		Закалка от 780 °С в воду после горячей деформации	Закалка от 780 °С в воду после трехчасового отжига при 760 °С	Закалка от 850 °С в воду
1	ОМШ	63	63	61
2	ОМШ	63	63	61
4	ГЖ	64	64	62
5	КШС	62	—	61
6	КШС	61	—	61

Исследование прокаливаемости методом объемной закалки (рис. 2, б-в) показало, что сталь плавов на чистой шихте по прокаливаемости различается мало (несколько ниже прокаливаемость у плавов КШС). Таким образом, повышение чистоты шихты уменьшает прокаливаемость стали У10А. Это хорошо согласуется с результатами дилатометрического анализа по устойчивости аустенита стали У10А разных плавов к распаду при охлаждении: чем больше

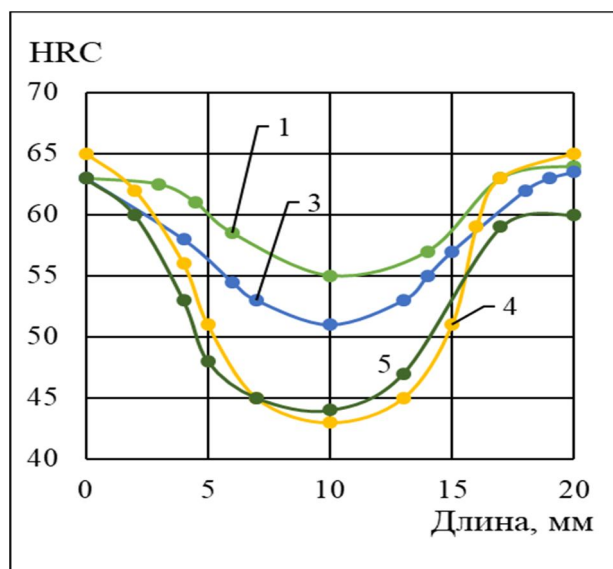
склонность к распаду, тем ниже прокаливаемость.

Проведенные исследования показали, что стали, выплавленные на первородной шихте, отличаются меньшим содержанием микропримесей, меньшей устойчивостью аустенита и меньшей прокаливаемостью.

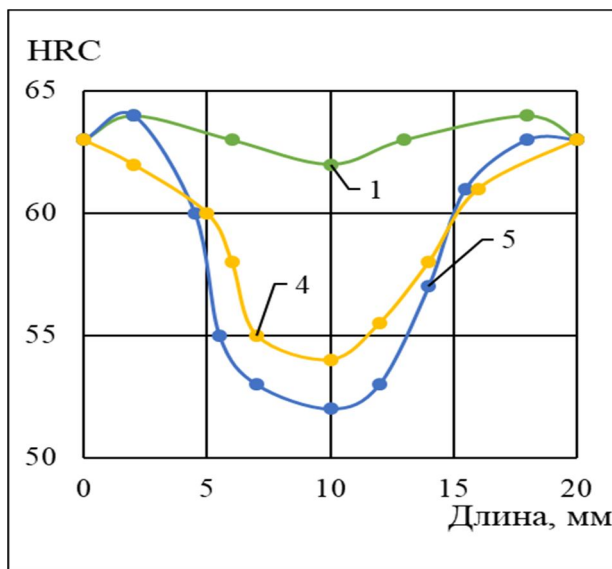
Следовательно, они должны иметь более высокую критическую скорость закалки, что необходимо учитывать при выборе режимов термической обработки.



а)



б)



в)

Рис . 2. Влияние вида шихты на прокаливаемость стали У10А, определенную методом торцевой закалки от 780 и 850 °С (а), объемной закалки (от 850 °С) квадратного (б) и круглого сечения (в). У кривых указаны номера плавов

Fig. 2. The effect of the type of charge on the hardenability of steel U10A, determined by the method of gradient quenching from 780 and 850 °C (а), volume hardening (from 850 °C) square (б) and round section (в). The curves indicate the numbers of heats

Перечисленные факторы вероятно должны оказывать влияние на служебные характеристики изделий, критерием которых является их долговечность.

Поэтому были проведены дополнительные исследования по определению влияния шихты и термообработки стали У10А на микроструктуру, механические

свойства и длительную прочность в средах, вызывающих водородное растрескивание. Перед испытаниями образцы подвергали стандартной термической обработке: нормализации от 840 °С (выдержка 0,5 ч); отжигу при 760 °С (выдержка 3 ч); закалке от 780 °С в воду и отпуску при 180 °С (вы-

держка 1,5 ч); закалке от 780 °С в воду и отпуску при 660 °С (выдержка 3 ч). Результаты исследований приведены в табл. 6.

Сравнение дисперсности структуры (табл. 7) показало, что наиболее измельчены структурные элементы ме-

талла КШС (литое состояние). Пластическая деформация приводит к уменьшению межпластинчатого расстояния перлитной структуры в среднем вдвое, при этом несколько выравнивается дисперсность по плавкам.

Таблица 6. Дисперсность перлитной структуры

Table 6. The dispersion of the pearlite structure

№ плавки	Шихта	Механические свойства				Стойкость в среде, вызывающей ВР при напряжении 300 МПа, час
		σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²	
Нормализация						
1	ОМШ	890	16,5	25	—	—
2	ОМШ	950	15,5	23	0,08	—
3	ГЖ	860	18	25	0,05	—
4	ГЖ	910	12,5	26	0,08	—
5	КШС	770	18	37	—	—
6	КШС	780	15	35	—	—
Отжиг						
1	ОМШ	620	28	56	0,28	87
2	ОМШ	720	21,8	35	0,34	65
3	ГЖ	660	26	44	0,27	203
4	ГЖ	630	32	60	0,20	314
5	КШС	660	25	53	0,62	411
6	КШС	690	28	56	0,69	480
Закалка и высокий отпуск						
1	ОМШ	720	27	49	0,24	50
2	ОМШ	730	26	49	0,35	40
3	ГЖ	700	27	56	0,48	96
4	ГЖ	740	24	57	0,32	124
5	КШС	740	25	52	0,81	165
6	КШС	770	23	51	0,84	198

Таблица 7. Дисперсность перлитной структуры

Table 7. The dispersion of the pearlite structure

№ плавки	Шихта	Дисперсность перлитной структуры, балл		Межпластинчатое расстояние, мкм	
		литое	деформированное	литое	деформированное
1	ОМШ	7,5	5	1,2	0,8
2	ОМШ	7,5	4	1,6	0,6
3	ГЖ	8	4	1,2	0,6
4	ГЖ	7	5	1,4	0,8
5	КШС	6	4	1,0	0,6
6	КШС	5	4	0,8	0,6

После нормализации структура стали представляет собой тонкопластинчатый перлит и небольшие выделения вторичного цементита. В плавках КШС колонии перлита имеют меньшие размеры; в остальных плавках они практически одинаковы. Закалка приводит к образованию мартенсита, остаточного аустенита и глобулей цементита. Как и следовало ожидать, более мелкоигольчатый мартенсит наблюдался в плавках на шихте КШС.

В нормализованном состоянии пластические и прочностные свойства стали опытных плавок практически не различались. В результате отжига снизился уровень прочностных характеристик стали и улучшились пластические свойства (особенно заметно у плавок ГЖ). Ударная вязкость плавок на шихте КШС была примерно вдвое больше, чем у стали ОМШ и ГЖ. После закалки и низкого отпуска опытные плавки имели различную ударную вязкость: 0,07...0,1 МДж/м² (КШС) и 0,03...0,04 МДж/м² (ОМШ и ГЖ). После за-

калки и высокого отпуска пластические свойства заметно улучшились, причем в большей степени у металла на первородной шихте. Одновременно металл КШС обладал и более высокими значениями прочностных и вязкостных характеристик. Серийные испытания на ударный изгиб при пониженных температурах (рис. 3) выявили очень высокие показатели ударной вязкости металла плавок на полупродукте КШС в интервале температур от +20 до –80 °С.

Исследование влияния способа выплавки стали на сопротивляемость водородному растрескиванию (см. табл. 6) позволило установить, что длительная прочность во многом зависит от режимов термической обработки и от чистоты стали. Более чистая сталь обладает большей стойкостью против водородного растрескивания и, следовательно, большей долговечностью в процессе эксплуатации [1, 5, 6]. Использование углеродистых сталей, выплавляемых на ГЖ, для изготовления деталей и металлических конструкций позволит увели-

чить их срок службы по сравнению с аналогичными сталями, полученными обычными способами [5].

Эксплуатационные характеристики опытных сталей как инструментального материала изучали в условиях производственных испытаний готового штампового инструмента.

Сравнительным испытаниям подвергали две партии матриц из восьми, изготовленных из плавок № 4 на ГЖ и

№ 1 на ОМШ-1 стали У10А и прошедших термическую обработку (на 61...63 HRC). Эти матрицы были предназначены для формовки вкладышей подшипников скольжения к двигателям внутреннего сгорания. Стойкость матриц из стали на основе первородной шихты до полного износа составила 190...370 тыс. ударов, а из стали обычной выплавки – 100...200 тыс. ударов.

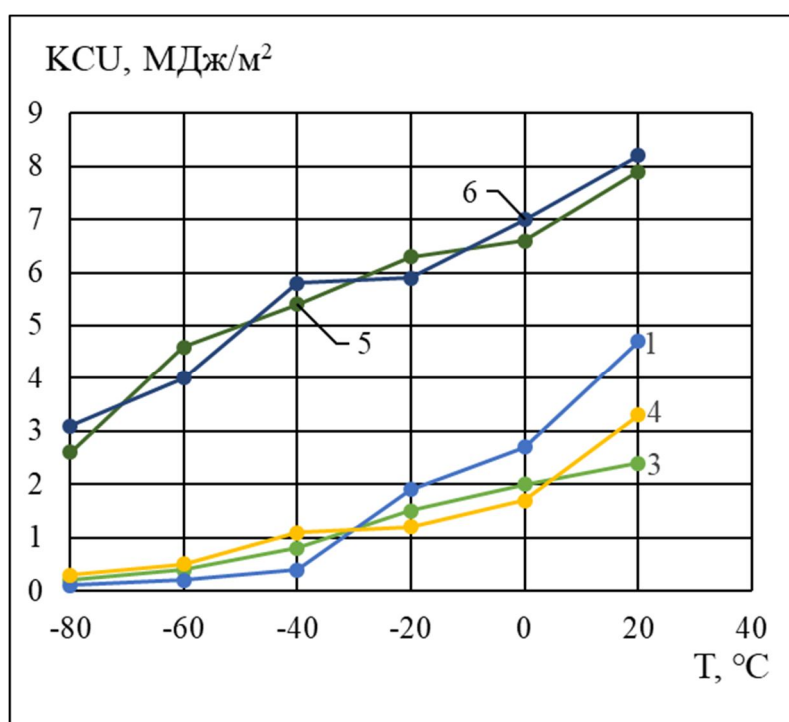


Рис. 3. Ударная вязкость исследованных плавок стали У10А, подвергнутых закалке и высокому отпуску (у кривых указаны номера плавок)

Fig. 3. Impact strength of the studied melts of steel U10A, subjected to hardening and high tempering (the numbers of the melts are indicated on the curves)

Таким образом, приведенные результаты комплексного исследования физико-механических свойств опытной стали У10А свидетельствуют о целесообразности использования металлized сырья при производстве высокоуглеродистых сталей и расширении областей их применения.

Выводы

1. Установлено, что использование чистой первородной шихты положительно сказывается на свойствах выплавленного металла. Сталь У10А, выплавленная на первородной шихте, по прочностным характеристикам не усту-

пает стали на ОМШ, превосходя последнюю по пластическим свойствам и особенно по ударной вязкости.

2. Показано, что сталь, выплавленная на первородной шихте, отличается более низким содержанием микропримесей, обладает меньшей устойчивостью к распаду аустенита и более низкой прокаливаемостью. Выявлено, что из-за меньшей устойчивости аустенита сталь, выплавленная на первородной шихте, должна иметь более высокую критическую скорость закалки, что следует учитывать при выборе режимов термообработки.

3. Установлено, что длительная прочность стали У10А в среде, вызывающей водородное растрескивание, во многом зависит от режимов термической обработки и от чистоты стали. Более чистая сталь обладает большей стойкостью против водородного растрескивания и, следовательно, большей долговечностью в процессе эксплуатации.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [8-30].

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. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: монография. Тула: Изд-воТулГУ, 2018. 430 с.
7. 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(31). С. 8-26.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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/1021869/2223-1560-2018-22-3-67-83>.

12. 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. <https://doi.org/1021869/2223-1560-2018-22-2-52-63>.

13. 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: Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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/1021869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.

25. 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. <https://doi.org/1021869/2223-1560-2017-21-6-85-95>.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. О состоянии предпревращения металлов и сплавов / 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.

30. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов. 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., Klementyev D. S. Vliyanie kachestva shikhty na chuvstvitel'nost' stali 30KhGSA k vodorodnomu rastreskivaniyu [Influence of charge quality on sensitivity of 30xgsa 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 the original 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, vyplavlennoi na pervorodnoi i obychnoi shikhte [Properties of steel 18X2H4VA, smelted on the original and conventional charge]. *Stal = Steel*, 1977, no. 7 (In Russ.).

5. Tereshchenko V. T., Sergeev N. N., Tinkova E. V., Yu. T. Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki stali U10A raznykh sposobov vyplavki [Dadeshkeliani Physical and mechanical characteristics of steel U10A different ways of smelting]. *Stal = Steel*, 1987, no. 2, pp. 86-90 (In Russ.).

6. Sergeev N. N., Sergeev A. N. *Mekhanicheskie svoistva i vnutrennee trenie vysokoprochnnykh stalei v korrozionnykh sredakh* [Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosive environments]. Tula, 2018, 430 p. (In Russ.).

7. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Minaev I. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementyev D. S. Vliyanie kachestva shikhty i temperatury otzhiga na formirovanie zerennoi struktury austenita v stali 30KhGSA [Influence of charge quality and annealing temperature on the formation of austenite grain structure in 30xgsa steel]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceed-*

ings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 8-26 (In Russ.).

8. 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 mechanical and corrosion properties of steel 23X2G2T]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva* = *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy*. P. A. Solovyov, 2018, no. 2 (45), pp. 128-135 (In Russ.).

9. 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 chemical composition of steel 23X2G2T on resistance against corrosion cracking]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = *Proceedings of the Tula State University. Technical science*, 2018, vol. 9, pp. 409-442 (In Russ.).

10. 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 staley 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.).

11. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klementyev D. S. Primenenie tekhnologii izgotovleniya «korkovym» sposobom formoobrazuyushchikh vstavok dlya lit'ya pod davleniem mednykh splavov [Application of manufacturing technology "cortical" method of 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/1021869/2223-1560-2018-22-3-67-83>.

12. Sergeev N.N., Izvolsky V.V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klementyev D. S. Vliyanie mikrostrukturnykh faktorov i termicheskoi obrabotki na korrozionnuyu stoikost' armaturnoi stali klassa A600 [Influence of microstructural factors and heat treatment on corrosion resistance of reinforcing steel class A600]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 2 (77), pp. 52-63 (In Russ.). <https://doi.org/1021869/2223-1560-2018-22-2-52-63>.

13. 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.).

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

15. 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.).

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

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

18. 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.).

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

20. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., Minaev I. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V. Vliyanie raznozernistosti austenita na kinetiku perlitnogo prevrashcheniya v malo- i sredneuglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [The effect of austenite grain diversity 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.).

21. 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 process of nucleation in the development of some phase transitions of the second kind]. *Materialovedenie = Materials science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

22. 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. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

23. Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Tikhonova I. V., Kutepov S. N., Kuzovleva 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.).

24. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sapozhnikov S. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Prinyatie reshenii po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produktsii [Decision-making on statistical models in product quality management]. *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/1021869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.

25. 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.). <https://doi.org/1021869/2223-1560-2017-21-6-85-95>.

26. 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. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

27. 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 [Variant of determination of maximum plastic hardening in tool steels]. *Stal' = Steel*, 2017, no. 6, pp. 26-39 (In Russ.).

28. 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.).

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

30. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E. *Plasticheskaya dilatatsiya i deformatsionnaya povrezhdaemost' metallov i spлавov* [Plastic dilatancy and deformation 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, Doctor of Engineering Sciences, 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, Doctor of Pedagogical Sciences, 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, Candidate of Pedagogical Sciences, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Минаев Игорь Васильевич, генеральный директор ООО НПП «Телар», Тула, Российская Федерация, e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Igor V. Minaev, General Director of the Research and Production Enterprise Telar LLC, Tula, Russian Federation, e-mail: ivminaev1960@yandex.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, Doctor of Engineering Sciences, 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, Doctor of Engineering Sciences, 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

Кругляков Олег Викторович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация, e-mail: krug_ov@yandex.ru

Oleg V. Kruglyakov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: krug_ov@yandex.ru