



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 620.21

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.043



СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ СТАЛИ 20ГЛ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Сергей Анатольевич Гаврилов ¹, Дмитрий Александрович Шефер ²,
Сергей Геннадьевич Иванов ³, Михаил Алексеевич Гурьев ⁴

^{1, 2, 3, 4} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

³ The Advanced Textile Technology Innovation Center (Jianhu Laboratory), Shaoxing, 312000, China

³ Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China

⁴ Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co, Ltd, Xingchang, 312500, China

¹ gavrilo. sergei@vniizht.ru

² shefer1402@mail.ru

³ serg225582@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

⁴ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

Аннотация. Работа посвящена актуальной проблеме повышения прочности литой малоуглеродистой и низколегированной стали 20ГЛ за счет применения модификаторов, используемых при выплавке стали. Изменение механических свойств достигалось путем печной и внепечной обработки расплава стали различными отечественными комплексными модификаторами и последующей термической обработки по выбранному режиму ТО. Образцы для сравнительных испытаний были получены по технологии литья по газифицируемым моделям (ЛГМ). Определение основных механических свойств проводилось при нормальной температуре, определение значений на ударный изгиб на образцах с U-образным надрезом – при минус 60 °С. Исследования показали существенную разницу в значениях свойств стали 20ГЛ в зависимости от применяемого модификатора. Применение комплексного модификатора МКкск 19 позволяет повысить сплошность отливки, снизить количество и размеры неметаллических включений и в целом получить однородную структуру по всему сечению образца (отливки). Ударная вязкость КСЧ₆₀ для всех образцов в ходе испытаний составила в 1,7–2,6 раза выше значений, указанных в ГОСТ 977-88, ГОСТ 21357-87 и ГОСТ 22703-2012. Однако наличие в структуре всех образцов видманитетта говорит о необходимости поиска наиболее оптимального режима ТО.

Ключевые слова: сталь, модифицирование, литье по газифицируемым моделям, ликвация, микроструктура, механические свойства, ударная вязкость, отрицательная температура.

Благодарности: Исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ и лаборатории микроскопических исследований ИЦ «ХимБиоМаш».

Для цитирования: Гаврилов С. А., Шефер Д. А., Иванов С. Г., Гурьев М. А. Сравнительные исследования эффективности отечественных модификаторов для стали 20ГЛ при литье по газифицируемым моделям // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 244–253. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.043. EDN: <https://elibrary.ru/HRUMLS>.

Original article

COMPARATIVE STUDIES OF EFFECTIVENESS DOMESTIC MODIFIERS OF 20GL STEEL OF CASTING ON GASIFIED MODELS

Sergey A. Gavrilo ¹, Dmitriy A. Schafer ², Sergey G. Ivanov ³, Michael A. Guryev ⁴

^{1, 2, 3, 4} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

³ The Advanced Textile Technology Innovation Center (Jianhu Laboratory), Shaoxing, 312000, China

³ Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China

⁴ Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co, Ltd, Xingchang, 312500, China.

¹ gavrilo. sergei@vniizht.ru

² shefer1402@mail.ru,

³ serg225582@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

⁴ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

Abstract. The work is devoted to the urgent problem of increasing the strength of cast low-carbon and low-alloy steel 20GL due to the use of modifiers used in steel smelting. The change in mechanical properties was achieved by furnace and out-furnace treatment of the steel melt with various domestic complex modifiers and subsequent heat

© Гаврилов С. А., Шефер Д. А., Иванов С. Г., Гурьев М. А., 2025

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ СТАЛИ 20ГЛ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

treatment according to the selected maintenance regime. The samples for comparative tests were obtained using gasified model casting (LGM) technology. The main mechanical properties were determined at normal temperature, and the values for impact bending on samples with a U-shaped incision were determined at minus 60 °C. Studies have shown a significant difference in the properties of 20GL steel, depending on the modifier used. The use of the MKksk 19 complex modifier makes it possible to increase the continuity of the casting, reduce the number and size of non-metallic inclusions, and generally obtain a uniform structure over the entire cross-section of the sample (casting). The impact strength of KCU-60 for all samples during the tests was 1.7-2.6 times higher than the values specified in GOST 977-88, GOST 21357-87 and GOST 22703-2012. However, the presence of Widmannstätt samples in the structure indicates the need to find the most optimal maintenance regime.

Keywords: steel, modification, casting according to gasified models, liquation, microstructure, mechanical properties, impact strength, negative temperature.

Acknowledgements: The research was carried out at the Center for Collective Use of AltSTU and the Laboratory of Microscopic Research of the Himbiomash Research Center.

For citation: Gavrilov, S.A., Schafer, D.A., Ivanov, S.G. & Guryev, M.A. (2025). Comparative studies of effectiveness domestic modifiers of 20GL steel of casting on gasified models. Polzunovskiy vestnik, (3), 244-243. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.043. EDN: <https://elibrary.ru/HRUMLS>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных методов повышения свойств стали без значительного изменения химического состава являются такие процессы, как рафинирование и модифицирование расплава в процессе его приготовления и на выпуске из печи (в ковше или в форме). Печная и внепечная обработка сплавов различными модификаторами в «большой металлургии» приобрела постоянный и массовый характер. Модифицирование применяется на всех без исключения крупных металлургических производствах нашей страны для уменьшения количества неметаллических включений, измельчения зерна, повышения пластичности и прочности. При изготовлении фасонного литья использование модификаторов также приобрело широкий формат. Однако разнообразие отечественных и иностранных модификаторов дают сильное различие свойств одного и того же сплава. Немаловажную роль играет при этом применяемая технология получения отливки, способ обработки модификатором (при плавке, при выпуске расплава в ковш и т.д.) и многие другие факторы.

В случае технологии литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) необходимо учитывать, что степень неоднородности химического состава (особенно по

углероду) на тонкостенных отливках значительно выше, чем при использовании любого другого способа получения отливки. И, конечно, этот факт нельзя не учитывать при подготовке расплава стали, его очистке, модифицировании и дальнейшей термической обработке литых изделий. В течение последних 25 лет технология ЛГМ активно внедряется в России практически на всех литейных предприятиях или в качестве основной, или как дополнительная [1–6].

В связи с высокой актуальностью в настоящей работе рассмотрено влияние широко применяемых в малой металлургии модифицирующих добавок российского производства на механические свойства и микроструктуру стали 20ГЛ при литье по газифицируемым моделям.

МЕТОДЫ

Модель заготовки для определения механических свойств изготавливалась путем вырезания из пенопласта марки ППС-17-РА (литейный) плотностью 17 кг/м³. Конструктивные параметры образцов-свидетелей, используемых в работе, изображены на рисунке 1. Все модели образцов-свидетелей были тщательно проверены на предмет отсутствия дефектов поверхности.

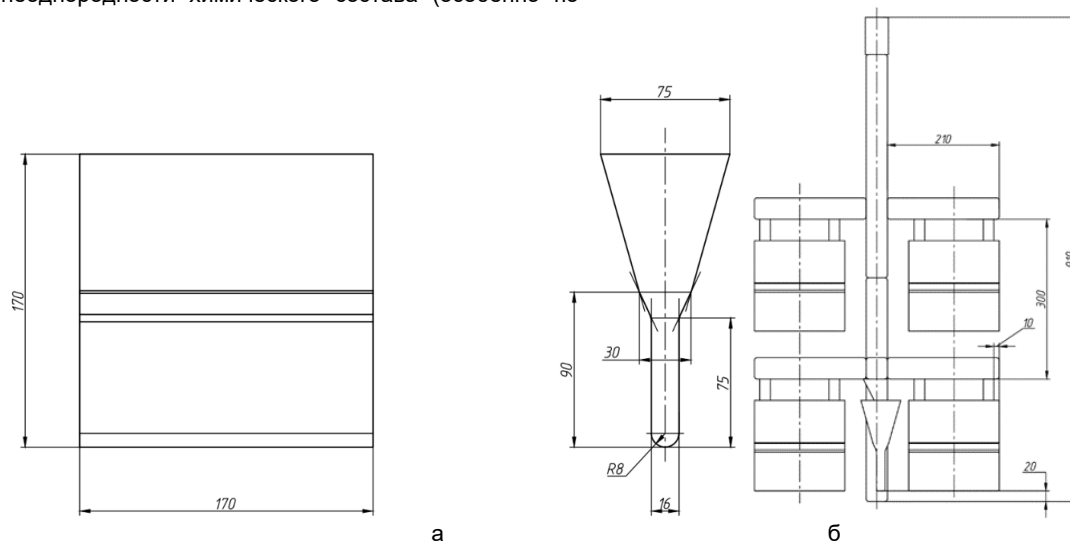


Рисунок 1 – Образец-свидетель: а – чертеж; б – схема сборки в блок

Figure 1 – Witness sample: a – drawing; b – assembly diagram in a block

Сборка моделей в блок осуществлялась пайкой. Собранные модельные блоки окрашивались огнеупорной краской «Газолит GS», которая наносилась методом обливания. Контроль вязкости и плотности

краски осуществлялся вискозиметром ВЗ-246 по ГОСТ 9070-75, средняя вязкость соответствовала 12,1 сек. Формовка просушенных модельных блоков производилась в специальные опоки-контейнеры

(1000x1000x1000 мм), оснащенные сетью вентиляционных каналов и имеющие два патрубка для вывода газов, образующихся при деструкции модели. В качестве формовочного материала использовали кварцевый песок марки 2K₂O₂03 по ГОСТ 2138-91.

В работе использовалась индукционная плавильная печь KGPS-350-1 с набивным тиглем емкостью 500 кг с нейтральной футеровкой. Химический анализ стали в цеховых условиях определялся с помощью эмиссионного спектрометра «МСА II», а окончательный химический состав на образцах определялся с помощью оптико-эмиссионного спектрометра «G.N.R. Solaris CCD Plus».

При заполнении формы расплавом использовался предварительно разогретый до 900 °С поворотный ковш емкостью 250 кг. Температура заливки контролировалась переносным прибором ТЦП – 1800П погружного типа со сменным термоэлектрическим преобразователем НСХ типа В (ПР30 /ПР6).

В качестве шихтовых материалов при выплавке стали 20ГЛ использовались: лом стали 09Г2С, отходы марок 1А, 2А по ГОСТ 2787, ферросилиций ФС75 по

ГОСТ 1415, ферромарганец ФМн88 по ГОСТ 4755. В качестве основного раскисляющего элемента применялся алюминий (электротехнический лом) в количестве 0,7 кг на плавку. С целью снижения количества общего шлака и неметаллических включений в отливках применялся коагулятор шлака марки КШП-1 как в печи, так и в ковше.

В качестве модифицирующих добавок в данной работе использовались наиболее распространенные на отечественном рынке модификаторы: 1) L-cast 5.3 ТУ 1717-005-75073896-2013 (ООО НПК «МеталлТехно-Пром», г. Иркутск), фракция от 15 до 2 мм; 2) Insteel 6.1 ТУ 0820-030-72684889-2015 (ООО НПП «Технология», г. Челябинск); 3) Insteel 6.4 ТУ 0820-107-72684889-2023 (ООО НПП «Технология», г. Челябинск); 4) МКкск 19 ТУ 0826-003-47647304-2001 (СРО «РАЛ», г. Сафоново).

Некоторые параметры заливки и обработки расплава, а также присвоенные номера для всех применяемых модификаторов указаны в таблице 1. В ходе работы выполнены 4 плавки, получены 30 образцов-свидетелей, всего 6 партий (6 способов применения) по 5 образцов-свидетелей (брусков).

Таблица 1 – Параметры заливки и способ модифицирования по плавкам

Table 1 – Filling parameters and the method of modification by melting

Номер плавки	Номер ковша	Температура, °С	Вакуум в опоке, МПа	Время заливки блока, сек	Номер образца	Особенности применения модификатора
L-cast 5.3						
1	Ковш 1	1610	0,03	30	№ 1 (5 брусков)	В конце плавки в печь на зеркало металла перед сливом в количестве 3 кг.
1	Ковш 2	1580	0,03	29	№ 2 (5 брусков)	Тоже + 1 кг в ковш
Insteel 6.4						
2	Ковш 1	1580	0,03	30	№ 3 (5 брусков)	На струю металла при сливе с печи, в ковш 1 кг (на ковш 250 кг)
МКкск19						
3	Ковш 1	1590	0,03	30	№ 4 (5 брусков)	В стояк перед заливкой из расчета 0,2 % от массы стояка
3	Ковш 2	1580	0,03	30	№ 5 (5 брусков)	
Insteel 6.1						
4	Ковш 1	1590	0,03	28	№ 6 (5 брусков)	На струю металла при сливе с печи, в ковш 1 кг (на ковш 250 кг)

В таблице 2 приведены результаты проведенного экспресс-анализа химического состава выплавляемой стали 20ГЛ по каждой плавке перед выпуском расплавленного металла в разливочный ковш. Все отливки кристаллизировались в аналогичных условиях. После кристаллизации осуществлялась выбивка отливок и их охлаждение на воздухе. После остывания отливок осу-

ществляли их отрезку от питателей, после чего отрезанные отливки подвергались термической обработке.

Термическая обработка готовых отливок проводилась в камерных печах типа СНОЛ, оборудованных ПИД-контроллерами «Термодат» по режиму: нагрев до 920 °С (выдержка 30 минут), закалка на воду, далее отпуск при 620 °С (2 часа), далее – охлаждение на спокойном воздухе.

Таблица 2 – Химический состав стали 20ГЛ до заливки в форму (экспресс-анализ)

Table 2 – Chemical composition of 20GL steel before casting (express analysis)

Элемент	Номер образца-свидетеля (номер плавки)			
	1 и 2 (1)	3 (2)	4 и 5 (3)	6(4)
	масс. %			
C	0,12	0,12	0,12	0,12
Si	0,40	0,40	0,40	0,28
Mn	1,11	1,17	1,04	1,10
P	0,013	0,018	0,016	0,023
S	0,008	0,005	0,009	0,008
Cr	0,035	0,033	0,046	0,041
Ni	0,039	0,035	0,052	0,037
Cu	-	-	-	-
Al	0,005	0,006	0,005	0,007

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ СТАЛИ 20ГЛ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

После соответствующей ТО из каждого бруска изготавливали по пять образцов для определения основных механических свойств – пропорциональные образцы диаметром 5 мм и рабочей частью 50 мм по ГОСТ 1497-84 тип III № 7 для испытаний при комнатной температуре и образцы для определения ударной вязкости с U-образным надрезом (KCU) при температуре минус 60 °С по ГОСТ 9454-78.

Готовые образцы подвергались испытанию на растяжение с использованием универсальной разрывной машины «Instron-3369». После испытаний и проведения всех необходимых измерений от разорванных и разрушенных образцов отбирали металлографические темплеты при помощи прецизионного отрезного станка «MICRACUT-201». Для проведения металлографических исследований, все вырезанные металлографические темплеты запрессовывались в специальный компаунд «BAKELIT» при помощи металлографического пресса «METAPRESS». После запрессовки производили шлифовку и последующую полировку металлографических образцов при помощи автоматического шлифовально-полировального станка «DIGIPREP-P».

При пробоподготовке использовались набор дисков шлифовальной бумаги различной зернистостью – от 240 до 2000. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовали воду. Полировку осуществляли на специализированных сушках «MET-FOKS» и «METAPO-V» с применением алмазных суспензий зернистостью 5, 3, 1 мкм. Отполированные образцы подвергались травлению в 4 % спиртовых растворах пикриновой и азотной кислот.

Металлографические исследования производили при помощи программно-аппаратного комплекса «Thixo Met-PRO», включающего в себя металлографический инвертированный оптический микроскоп

«Carl Zeiss Axio Observer Z1m [7] по методикам, приведенным в [8].

Для проведения сравнительного анализа, а также определения модифицирующего воздействия, вырезка образцов велась и из литых образцов, не подвергавшихся термической обработке. Размеры таких образцов 16х32 мм. Подготовка поверхностей к изучению велась аналогично вышеописанным образцам с разницей в том, что такие образцы не проходили запрессовку в компаунд.

ДюрOMETрические исследования проводились с использованием полуавтоматического универсального твердомера МН-6, твердомерах Бринелля ТБ 5005А Tochtline и Роквелла ТР Tochtline.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 3 приведен химический состав всех полученных плавок и образцов-свидетелей, вырезанных из соответствующих отливок. Можно отметить, что на готовых отливках количество серы не превышает 0,011 % масс. во всех приведенных случаях. Однако такой эффект по сере достигается, вероятно, не воздействием применяемых модификаторов, а чистотой применяемых изначально шихтовых материалов. Комплексные модификаторы, использованные при выплавке экспериментальных плавок, оказали положительный эффект на снижение содержания фосфора (Insteel 6.4, Insteel 6.1 и МКкск19), при этом наилучший эффект показал модификатор МКкск19 – снижение фосфора с 0,023 до 0,013 % масс относительно немодифицированных образцов. Остальные исследованные модификаторы также продемонстрировали значительное снижение содержания фосфора, однако немного уступили МКкск19 (табл. 3).

Таблица 3 – Химический анализ образцов-свидетелей / Table 3 – Chemical analysis of witness samples

Элемент	Номер образца-свидетеля (плавки)						20ГЛ ГОСТ 977-88	20ГЛ ГОСТ 21357-87
	1(1)	2(1)	3(2)	4(3)	5(3)	6(4)		
C	0,23	0,24	0,19	0,25	0,20	0,24	0,15–0,25	0,17–0,25
Si	0,40	0,42	0,50	0,52	0,48	0,42	0,2–0,4	0,3–0,5
Mn	1,05	1,06	1,09	1,02	1,012	1,07	1,2–1,4	1,1–1,4
P	0,014	0,015	0,014	0,013	0,013	0,013	до 0,04	до 0,03
S	0,011	0,011	0,010	0,011	0,011	0,011	до 0,04	до 0,03
Cr	0,070	0,065	0,063	0,068	0,068	0,064	–	до 0,3
Ni	0,024	0,024	0,019	0,032	0,032	0,020	–	до 0,3
Cu	0,047	0,047	0,038	0,095	0,096	0,104	–	до 0,3
Al	0,065	0,062	0,135	0,065	0,079	0,081	–	–
Nb	0,003	до 0,002	0,003	до 0,002	до 0,002	до 0,002	–	–
Ce	до 0,002	до 0,002	до 0,002	до 0,002	до 0,002	до 0,002	–	–
La	до 0,005	до 0,002	до 0,005	до 0,005	до 0,005	до 0,005	–	–
Mg	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	–	–

Структура всех литых образцов до их термической обработки представлена видманштеттом. Результаты испытаний по определению основных механических свойств термообработанных образцов из стали 20ГЛ представлены в таблице 4.

Одним из самых высоких показателей ударной вязкости (66 МПа) и пластичности (относительное сужение – 63 % при относительном удлинении 17 %) продемонстрировал образец № 1 (таблица 4), модифицированный модификатором L-cast 5.3. Однако с точки зрения оптимального комплекса эксплуатационных свойств наилучшие показатели демонстрирует образец № 4 (таблица 4, модификатор МКкск19), сочетая высокие показатели пределов прочности и

текучести с высокими показателями ударной вязкости и пластичности. Исходя из этого, было принято решение провести сравнительный металлографический анализ с целью выявления структурно-фазового строения и поиска путей дальнейшей оптимизации режимов термической обработки [9–11].

Структурно-фазовый анализ производили в двух взаимно перпендикулярных проекциях сечения образцов (вдоль и поперек направления кристаллизации), которые совпадали с направлением проекций образцов для проведения испытаний на ударный изгиб: направление «поперек» совпадало с поперечным сечением образца, продольное направление – соответственно с продольным.

Таблица 4 – Результаты механических испытаний после термической обработки (среднее по пяти образцам)

Table 4 – Results of mechanical tests after heat treatment (average of 5 samples)

№ образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относ-е удлинение, %	Относ-е сужение, %	Ударная вязкость KCU ₆₀ , кгс/см ² (МПа)	Твердость, HRC
1	380,2	524,7	16,6	62,7	66,12 (6,48)	17,6
2	400,9	549,8	14,3	52,7	53,74 (5,27)	14,9
3	361,4	494,5	13,7	54,0	53,42 (5,24)	17,0
4	493,0	623,5	15,5	58,5	43,42 (4,26)	18,4
5	430,9	570,3	16,6	57,4	64,30 (6,31)	19,7
6	436,4	576,7	15,1	57,2	54,02 (5,30)	19,7

Образец № 1

При изучении макроструктуры образца в продольном и поперечном направлениях выявлены одиночные неметаллические (преимущественно шлаковые) включения, преимущественно глобулярной формы. Средний диаметр включений составляет порядка 30 мкм, при минимальном диаметре около 22 мкм и максимальном диаметре – порядка 90 мкм. Плотность включений максимального диаметра (порядка 90 мкм) составляет около 1 шт/250 мм², а включений минималь-

ного диаметра (около 22 мкм) – порядка 5 шт/100 мм², следовательно, загрязненность материала образца № 1 неметаллическими включениями следует признать удовлетворительной. Газовых пор и раковин при исследовании образца № 1 выявлено не было. В совокупности все вышеперечисленное позволяет утверждать о достаточно высокой сплошности и монолитности отливки, соответствующих образцу № 1.

Структурно-фазовое состояние образца в обоих направлениях идентично и представлена на рисунке 2.

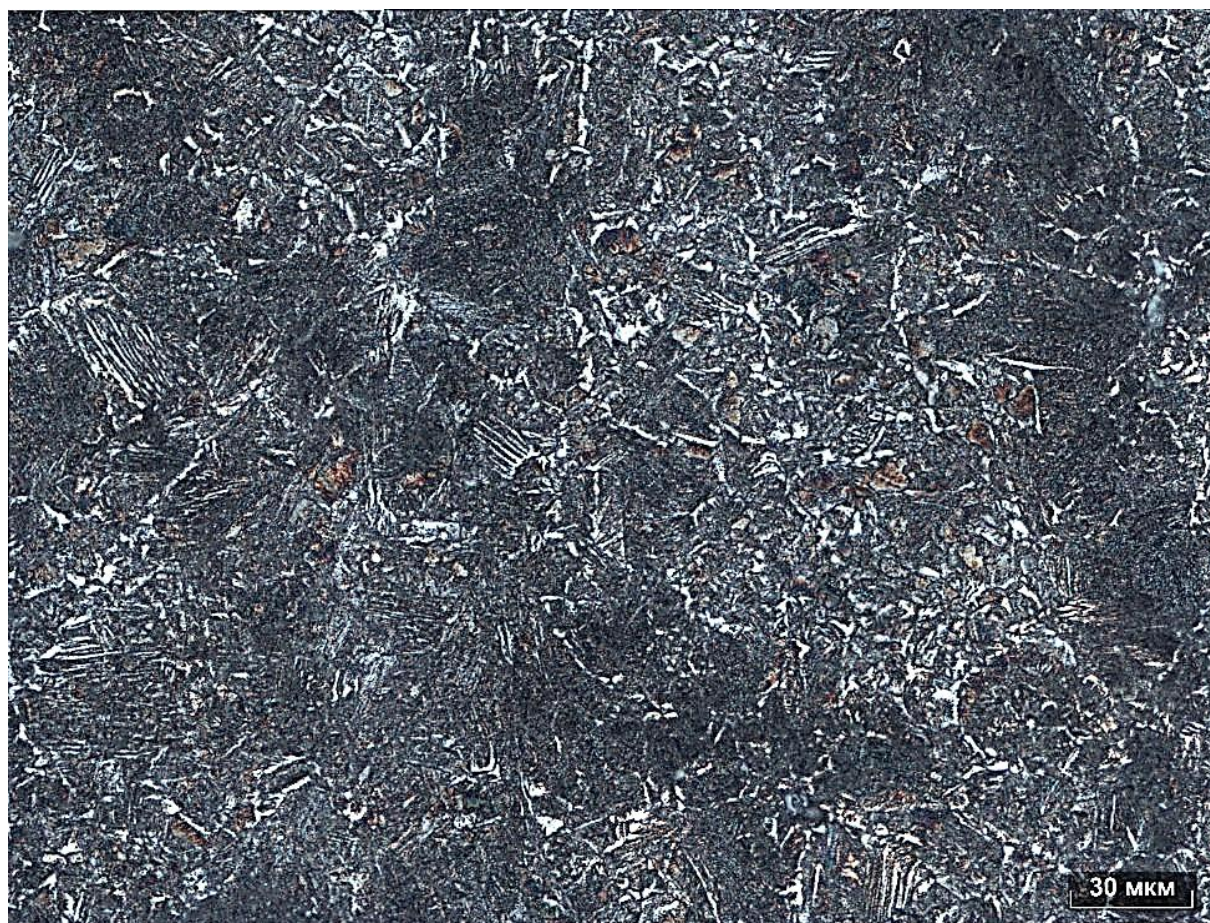


Рисунок 2 – Структура стали при оптическом увеличении x500

Figure 2 – Steel structure at optical magnification of x500

Согласно данным структурно-фазового анализа, структура образца представлена видманштеттом, соответствующим 1 баллу по ГОСТ 5640-68. При этом границы бывшего аустенитного зерна обозначены ферритной сеткой, а кроме того, заметно некоторое (порядка 15 об. %) количество игольчатого феррита, что позволяет утверждать о неоптимальных параметрах термической обработки, а именно – о перегреве,

сопряженном с длительной выдержкой при температуре аустенизации.

По результатам анализов величины зерна после термической обработки, а также по результатам установления величины бывшего аустенитного зерна, установлено, что после термической обработки величина зерна соответствует в среднем 8 баллу, а бывшего аустенитного зерна – 3 баллу (рис. 3).

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ СТАЛИ 20ГЛ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

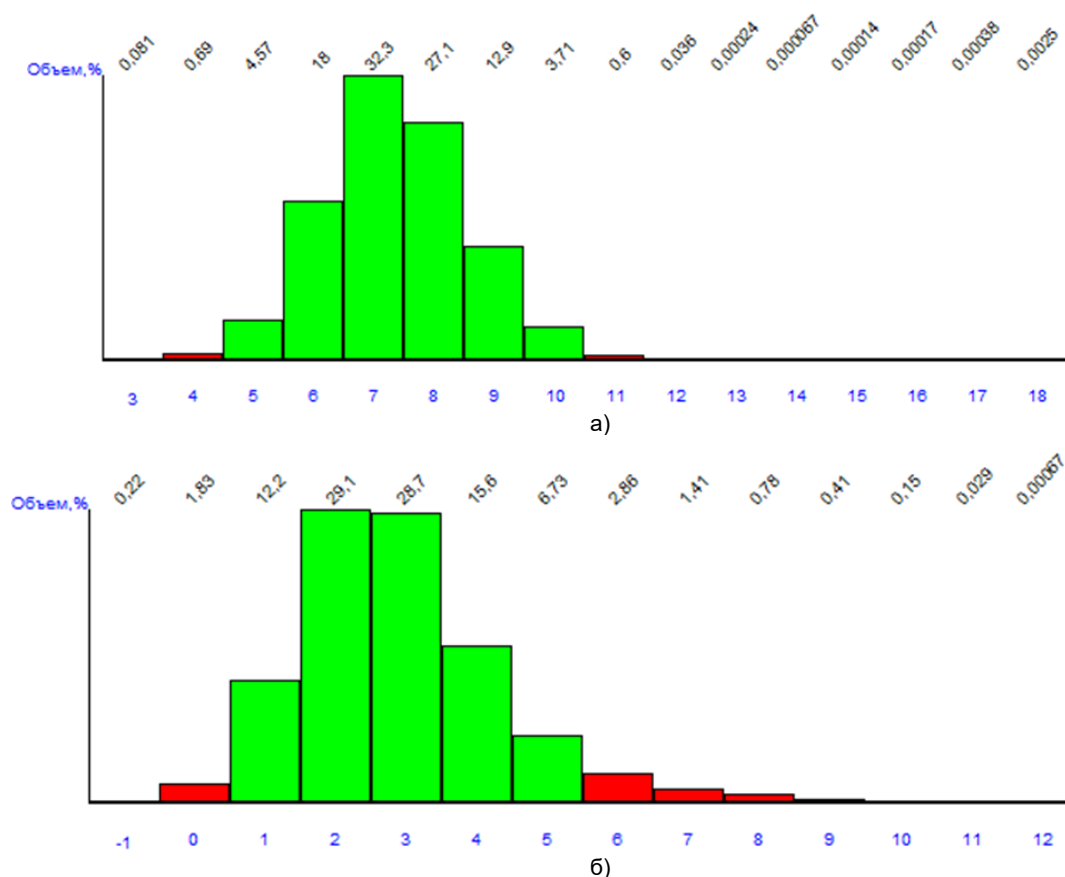


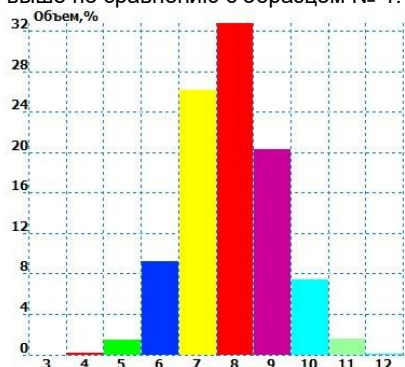
Рисунок 3 – Гистограммы распределения размеров зерна в образце № 1 после термической обработки (а) и до термической обработки (б)

Figure 3 – Histograms of grain size distribution in sample No. 1 after heat treatment (a) and before heat treatment (b)

Образец № 4

В случае образца № 4 неметаллических включений значительного диаметра и газовых пор обнаружено не было. В образце имеются шлаковые включения диаметром от 9 до 14 мкм и плотностью приблизительно 3 шт/100 мм². Исходя из этого, можно утверждать, что качество образца № 4 по загрязненности неметаллическими включениями и газовыми порами выше по сравнению с образцом № 1.

По результатам анализов величины зерна после термической обработки, а также по результатам установления величины бывшего аустенитного зерна ясно, что после термической обработки величина зерна соответствует в среднем 8 баллу, при этом коэффициент анизотропии близок к единице (рис. 4). Балл зерна бывшего аустенитного зерна соответствует 4 баллу (рис. 5).



№	Цвет	Балл	Объем, %
1.		5	1,55
2.		6	9,29
3.		7	26,2
4.		8	32,8
5.		9	20,4
6.		10	7,55
7.		11	1,67
Среднее			7,91

Рисунок 4 – Результаты анализа с цветовой дифференциацией зерен по размерам в образце № 4

Figure 4 – Results of the analysis with color differentiation of grains by size in sample No. 4

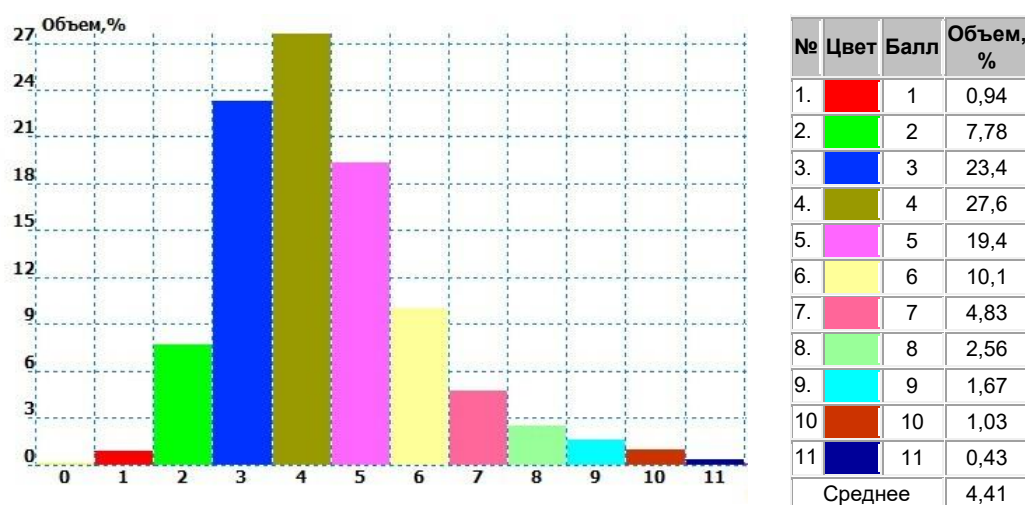


Рисунок 5 – Результаты анализа бывшего аустенитного зерна с цветовой дифференциацией зерен по размерам в образце № 4

Figure 5 – The results of the analysis of the former austenitic grain with color differentiation of grains by size in sample No. 4

Как видно из рисунка 5, образец № 4 отличается от образца № 1 также и более мелким бывшим аустенитным зерном: 4,41 против 2,91. Это позволяет утверждать, что в случае образца № 4 установлен более правильный режим модифицирования, а также то, что модификатор, использованный для образца № 4, содержал некоторое количество труднорастворимых в рас-

плавленной стали ультрамелкодисперсных соединений, которые на стадии кристаллизации выступили в качестве центров зарождения новых зерен, а затем при термической обработке снизили скорость роста аустенитного зерна. Структура стали образца № 4 при оптическом увеличении x500 представлена на рисунке 6.

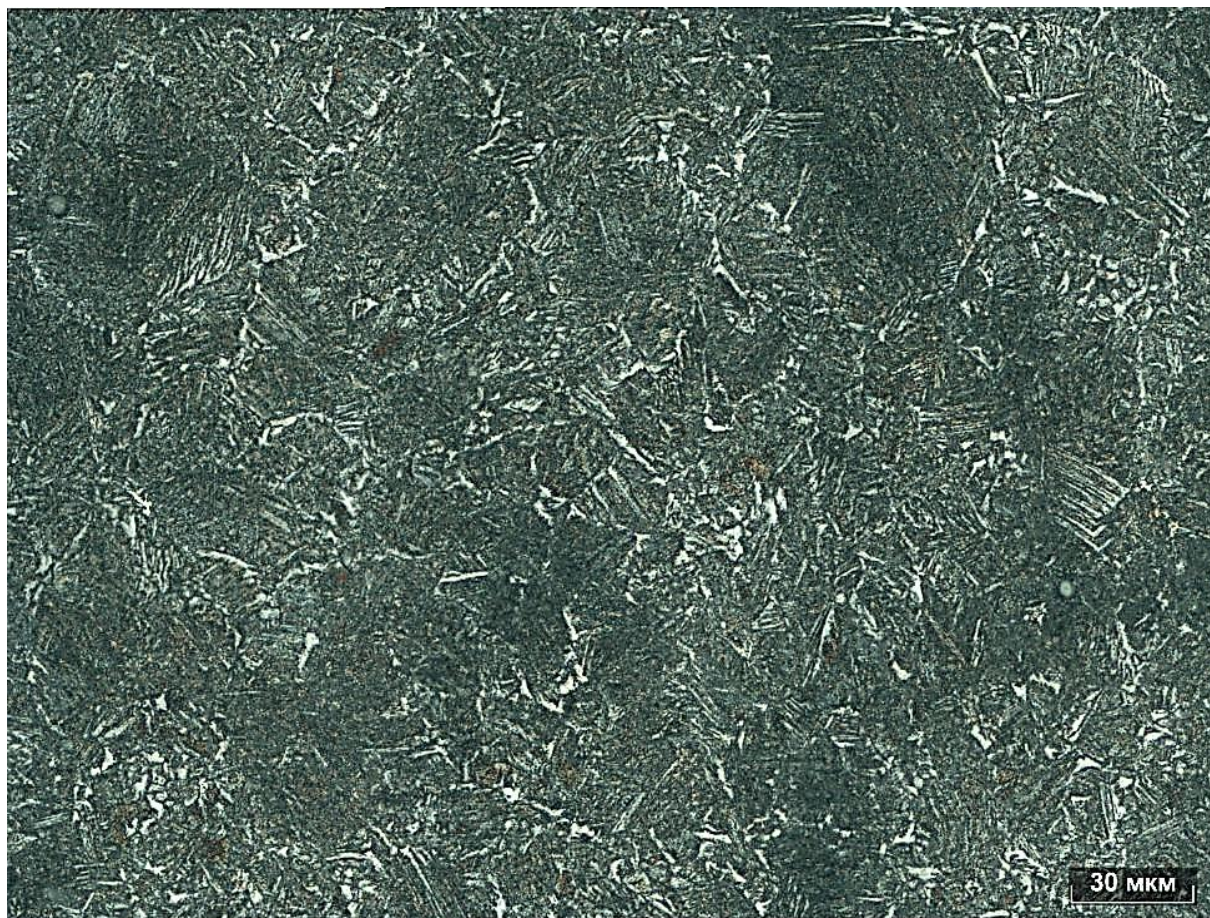


Рисунок 6 – Структура стали образца № 4 при оптическом увеличении x500

Figure 6 – Steel structure of sample No. 4 at optical magnification of x500

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ СТАЛИ 20ГЛ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Как и в образце № 1, структурно-фазовое состояние исследованного образца № 4 соответствует видманштетту. При этом согласно проведенному анализу, количество феррита в образце № 4 несколько больше по сравнению с образцом № 1, также больше и количество игольчатого феррита – по результатам автоматизированной оценки, в случае образца № 4. В остальном структуры образцов №№ 1 и 4 в целом совпадают как на продольных, так и на поперечных шлифах.

ВЫВОДЫ

1. Применение комплексных модификаторов (L-cast 5.3, Insteel 6.4, Insteel 6.1, МКкск 19) при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи не способствуют снижению содержания серы, однако в случае применения модификатора МКкск 19 наблюдается наибольшее снижение фосфора по сравнению с немодифицированной сталью 20ГЛ: с 0,023 до 0,013 % масс.

2. Применение комплексного модификатора МКкск 19 позволяет повысить сплошность отливки, снизить количество и средний размер неметаллических включений.

3. Выбранный режим ТО для всех образцов позволяет обеспечить показатели механических свойств в соответствии с требованиями стандартов (ГОСТ 977-88, ГОСТ 21357-87 и ГОСТ 22703-2012), а по такому показателю, как КСЧ₆₀, превысить минимальные требуемые значения в 1,7–2,6 раза, что позволяет говорить о повышении надежности и работоспособности отливок в условиях пониженных температур.

4. Наличие в структуре образцов видманштетта (игольчатого феррита) говорит о необходимости поиска более оптимального режима ТО, а именно точного определения температуры и времени выдержки перед закалкой, при соблюдении которых удастся избежать видманштетта, что, в свою очередь, позволит в еще большей степени повысить эксплуатационные характеристики отливок из стали 20ГЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности структуры тонких образцов из стали 20ГЛ, полученных литьем по газифицируемым моделям / А.Е. Ерболатов [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 2. С. 139–144. doi: 10.25712/ ASTU.2072-8921.2022.02.019. EDN: <https://elibrary.ru/lbskmm>.
2. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. СПб. : НПО «Профессионал», 2007. 408 с. ISBN 978-5-91259-011-5.
3. Упрочнение деталей агропромышленного оборудования, применяемых в климатических условиях Монголии / Лыгденов Б.Д., Фильчаков Д.С., Галаа О., Жавхалан Б. // Успехи современного естествознания. 2015. № 1–8. С. 1345–1347.
4. Механизмы структурообразования при взаимодействии титана с расплавом алюминия / Гуревич Л.М. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 6 (109). С. 6–13.
5. О повышении качества отливок, полученных литьем по газифицируемым моделям / Чуманов И.В., Порсев М.А. // Литейное производство. 2017. № 3. С. 19–22.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 19 Nov 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.

6. Литье по газифицируемым моделям износостойких деталей / Кузембаев С.Б., Есжанов Г.С., Нурмаганбетов Ж.О., Акинов Е.К. // В сб. : Борисовские чтения. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Отв. за выпуск Е.С. Воеводин. Красноярск, 2021. С. 234–238.

7. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А., Романенко В.В. Особенности методики подготовки образцов для автоматического анализа карбидной фазы стали Х12Ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "Thixomet PRO" // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 165–168.

8. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Гурьев А.М., Романенко В.В. Фазовый анализ боридных комплексных диффузионных слоев на углеродистых сталях при помощи цветного травления // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17. № 1. С. 74–77.

9. Гурьев А.М., Хараев Ю.П. Теория и практика получения литого инструмента. Барнаул, ООО «НИЦ «Системы управления», 2005. 221 с.

10. Особенности формирования структуры диффузионного слоя на литой стали при химико-термической обработке / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Махаров Д.М., Мосоров В.И., Черных Е.В., Гурьева О.А., Иванов С.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2005. Т. 2. № 1. С. 39–41.

11. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М. // Сборник научных трудов X международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств». Барнаул, 2009. С. 40–46.

Информация об авторах

С. А. Гаврилов – аспирант АлтГТУ.

Д. А. Шефер – магистрант кафедры «Технологии машиностроения», АлтГТУ.

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Научного управления АлтГТУ, ведущий научный сотрудник.

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения» АлтГТУ, технический директор Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co. Ltd.

Information about the authors

S.A. Gavrilov - graduate student, of the Polzunov Altai State Technical University.

D.A. Shefer - master student of the Department «Mechanical Engineering Technology» of the Polzunov Altai State Technical University.

S.G. Ivanov - Doctor of Technical Sciences, a leading researcher at the Scientific Department of Polzunov Altai State Technical University, a leading researcher at The Advanced Textile Technology Innovation Center (Jianhu Laboratory), Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory.

M.A. Guryev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies at Polzunov Altai State Technical University, Technical Director of Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co. Ltd.