

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.791:621.771

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.014

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ШХ15. ЧАСТЬ II: ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МИКРОСТРУКТУРУ

**Сергей Анатольевич Земляков¹, Михаил Николаевич Зенин^{2†}, Сергей Геннадьевич Иванов³,
Михаил Алексеевич Гурьев⁴, Евгения Владимировна Черных⁵,
Алексей Михайлович Гурьев⁶, Денис Игоревич Зюзин⁷**

¹ ООО УК «Алтайский завод прецизионных изделий», пр. Космонавтов, 6/2, 656023, Барнаул

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

^{1, 3, 4, 6} Уханьский текстильный университет, ул. Фангжи, 1, 430073, Ухань, КНР

⁴ Чжэцзян Бриллиант Холодильное Оборудование Ко., ООО, Руао Промышленный парк, Синчан, провинция Чжэцзян, 312500, КНР

¹ kobalt_20@mail.ru

² Mikhail.zenin.96@mail.ru[†]

³ sergey225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

⁴ guriyevma@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

⁵ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

⁶ guriyevam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

⁷ denis.physic96@gmail.com

Аннотация. Наличие остаточного аустенита нежелательно в случае изготовления из стали ШХ15 деталей прецизионного назначения в силу того, что при эксплуатации неизбежно его превращение в мартенсит, следствием которого является изменение геометрических размеров деталей, что в итоге может привести к заклиниванию прецизионных пар, либо образованию трещин и выходу из строя прецизионного узла или агрегата. В настоящем исследовании показано изменение структурно-фазового состояния и микроструктуры закаленной конструкционной стали ШХ15 в зависимости от режима температуры отпуска и обработки холодом. Установлено, что стимуляция мартенситного превращения путем обработки холодом либо криогенной обработки приводит к дроблению аустенитных включений, незначительно снижая при этом общее содержание остаточного аустенита. Размер карбидных включений в случае обработки холодом либо криогенной обработки можно считать инвариантным, при этом общее количество частиц карбидных выделений увеличивается в 6,5 и в 8,4 раза соответственно в случае обработки холодом при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и криогенной обработке при $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с традиционной термической обработкой.

Ключевые слова: конструкционная подшипниковая сталь ШХ15, термическая обработка, микроструктура, временное сопротивление, ударная вязкость, твердость, аустенит, мартенсит.

Для цитирования: Земляков С.А., Зенин М.Н., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Гурьев А.М., Зюзин Д.И. Оценка влияния режимов термической обработки с использованием отрицательных температур на механические свойства стали ШХ15. Часть II: влияние режимов термообработки на структурно-фазовое состояние и микроструктуру // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2024. Т. 21, № 2. С. 254–262. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.014.

Original article

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES USING NEGATIVE TEMPERATURES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ShKh15 STEEL.
PART II: THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES ON THE STRUCTURAL-PHASE STATE AND MICROSTRUCTURE

Sergey A. Zemlyakov¹, Mikhail N. Zenin^{2†}, Sergey G. Ivanov³, Mikhail A. Guryev⁴,
Evgeniya V. Chernykh⁵, Alexey M. Guryev⁶, Denis I. Ziuzin⁷

¹ LLC UK «Altai Precision Products Plant», Cosmonauts Str., 6/2, Barnaul, 656023, Russia

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

^{1, 3, 4, 6} Wuhan Textile University, Fangzhi Road, 1, Wuhan, 430073, China

⁴ Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd., Ruao Industry Park, Xingchang, Zhejiang Province, 312500, China

¹ kobalt_20@mail.ru

² mikhail.zenin.96@mail.ru†

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

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

⁵ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

⁶ guryevam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

⁷ denis.physic96@gmail.com

Abstract. The presence of retained austenite is undesirable in the case of manufacturing precision parts from ShKh15 steel due to the fact that during operation its transformation into martensite is inevitable, which results in a change in the geometric dimensions of the parts, which ultimately can lead to jamming of precision pairs, or the formation of cracks and failure building a precision unit or assembly. This study shows the change in the structural-phase state and microstructure of hardened structural steel ShKh15 depending on the temperature regime of tempering and cold treatment. It has been established that stimulation of martensitic transformation by cold treatment or cryogenic treatment leads to fragmentation of austenite inclusions, while slightly reducing the total content of retained austenite. The size of carbide inclusions in the case of cold treatment or cryogenic treatment can be considered invariant, while the total number of particles of carbide precipitates increases by 6.5 and 8.4 times, respectively, in the case of cold treatment at -60 °C and cryogenic treatment at -196 °C compared to traditional heat treatment.

Keywords: structural bearing steel ShKh15, heat treatment, microstructure, tensile strength, impact strength, hardness, austenite, martensite.

For citation: Zemlyakov, S. A., Zenin, M. N., Ivanov, S. G., Guryev, M. A., Chernykh, E. V., Guryev, A. M. & Ziuzin, D. I. (2024). Estimation of the influence of heat treatment modes using negative temperatures on the mechanical properties of ShKh15 steel. Part II: the influence of heat treatment modes on the structural-phase state and microstructure. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(2), 254–262. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.014.

Введение

Актуальность и необходимость проведения данного исследования представлены в первой части работы [1], там же представлены режимы термической обработки (ТО). В данной работе приводятся результаты исследования структурно-фазового состояния и микроструктурного анализа термообработанных по соответствующим режимам образцов.

Методика

Металлографические темплеты вырезались при помощи прецизионного отрезного металлографического станка «MICRACUT–201», вырезанные темплеты запрессовывались в бакелитовый компаунд на металлографическом прессе

«МЕТAPRESS-P». Шлифовку и полировку осуществляли на автоматическом шлифовально-полировальном станке «DIGIPREP» с применением алмазных шлифовальных кругов зернистостью 54, 30, 15, 6 мкм. Полировку осуществляли на сукнах «МЕТ-FOKS» и «МЕТ-Mamba» при помощи алмазных монокристаллических суспензий зернистостью 3, 1, 0,5, 0,2 мкм. Суперфинишную полировку осуществляли кислой суспензией «МЕТ-OPS» зернистостью 0,05 мкм.

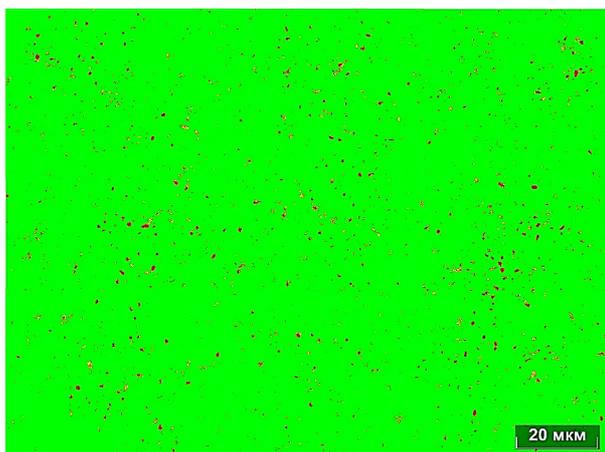
Травление для определения структурно-фазового состояния осуществляли реактивом Бераха (I) а также реактивом Бераха «10/3», для определения содержания остаточного аустенита осуществляли последовательное травление реактивом Бераха «сульфамин-I», затем – реактивом Гроесбека. Анализ структурно-фазового

состояния и структурных составляющих осуществляли при помощи программного комплекса «Thixomet PRO» по методикам [2-6].

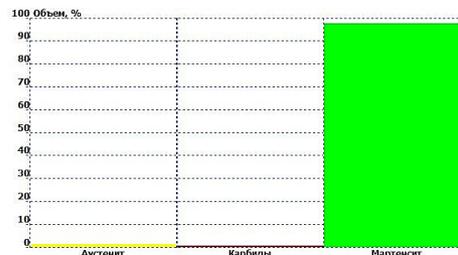
Результаты и обсуждение

Как видно из представленных на рисунке 1 результатов анализа содержания остаточного

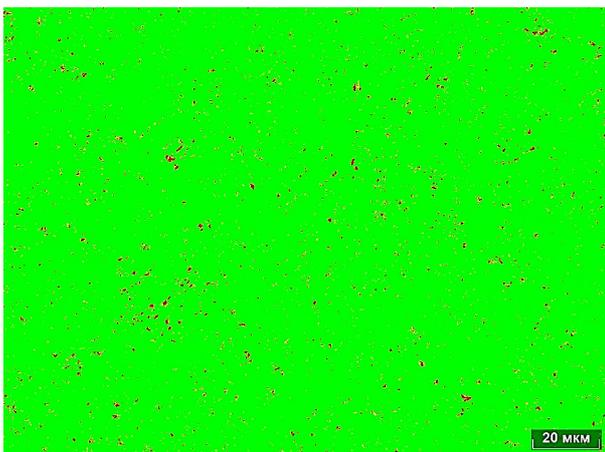
аустенита, его наименьшее содержание (1,06 об. %) наблюдается в случае термообработки по режиму № 4 – закалка с 845 °С, обработка холодом -60 °С, 24 ч, отпуск 260 °С, 2 ч. Во всех остальных случаях содержание остаточного аустенита находится в пределах от 1,44 об. % до 2,21 об. %.



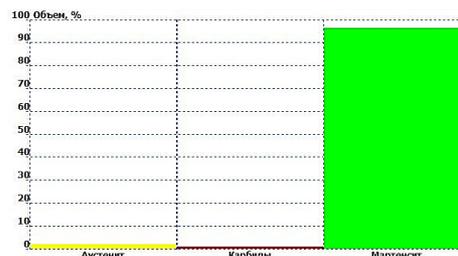
Режим № 1: Закалка с 845 °С, отпуск 170 °С, 2 ч



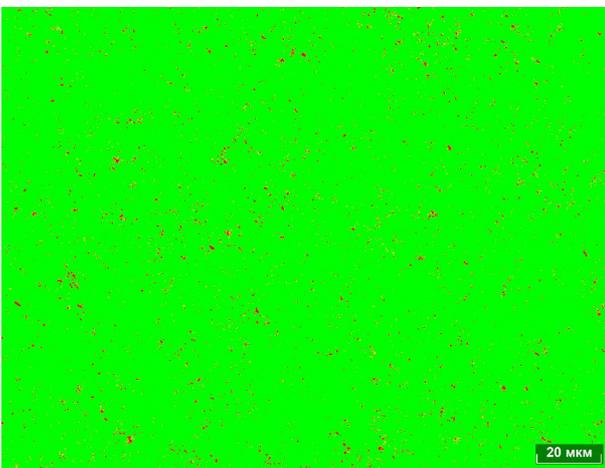
Фаза	Объем, %
Карбиды	0,69
Мартенсит	97,88
Аустенит	1,44



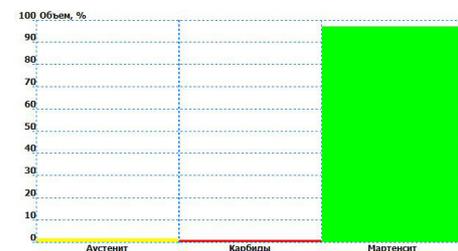
Режим № 2: Закалка с 845 °С, отпуск 260 °С, 2 ч



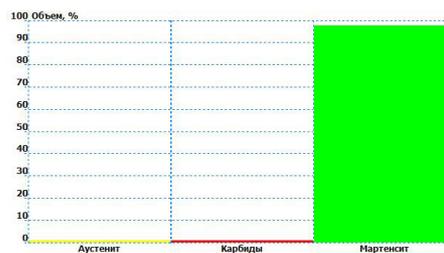
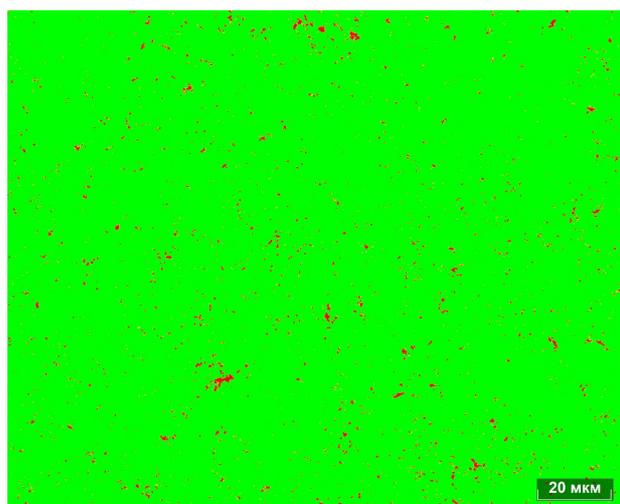
Фаза	Объем, %
Карбиды	1,10
Мартенсит	96,69
Аустенит	2,21



Режим № 3: Закалка с 845 °С, обработка холодом -60 °С, 24 ч, отпуск 170 °С, 2 ч

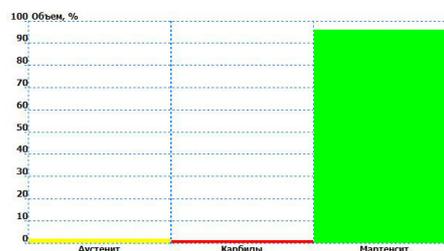
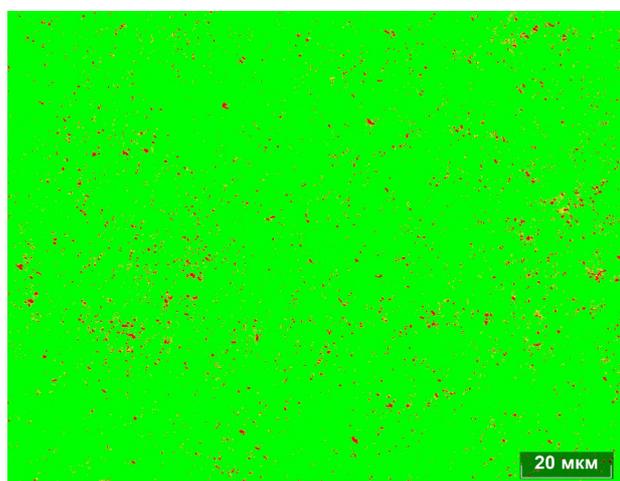


Фаза	Объем, %
Карбиды	1,13
Мартенсит	97,18
Аустенит	1,68



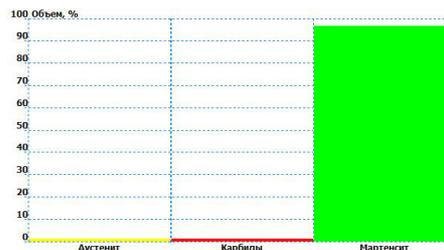
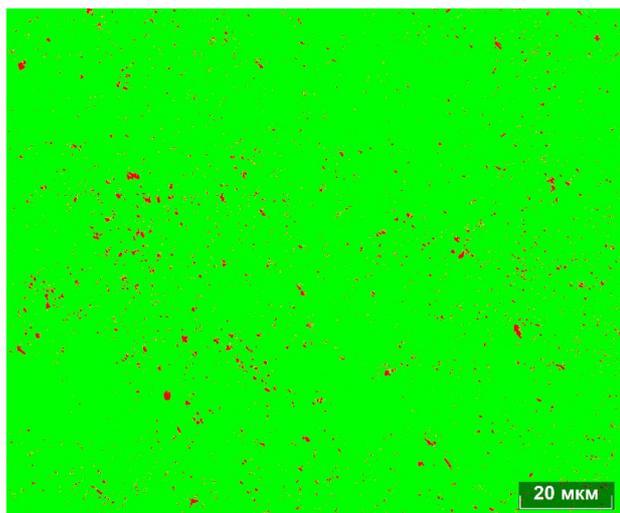
Фаза	Объем, %
Карбиды	1,17
Мартенсит	97,77
Аустенит	1,06

Режим № 4: Закалка с 845 °С, обработка холодом -60 °С, 24 ч, отпуск 260 °С, 2 ч



Фаза	Объем, %
Карбиды	1,40
Мартенсит	96,41
Аустенит	2,20

Режим № 5: Закалка с 845 °С, криогенная обработка -196 °С, 24 ч, отпуск 170 °С, 2 ч



Фаза	Объем, %
Карбиды	1,47
Мартенсит	97,02
Аустенит	1,51

Режим № 6: Закалка с 845 °С, криогенная обработка -196 °С, 24 ч, отпуск 260 °С, 2 ч

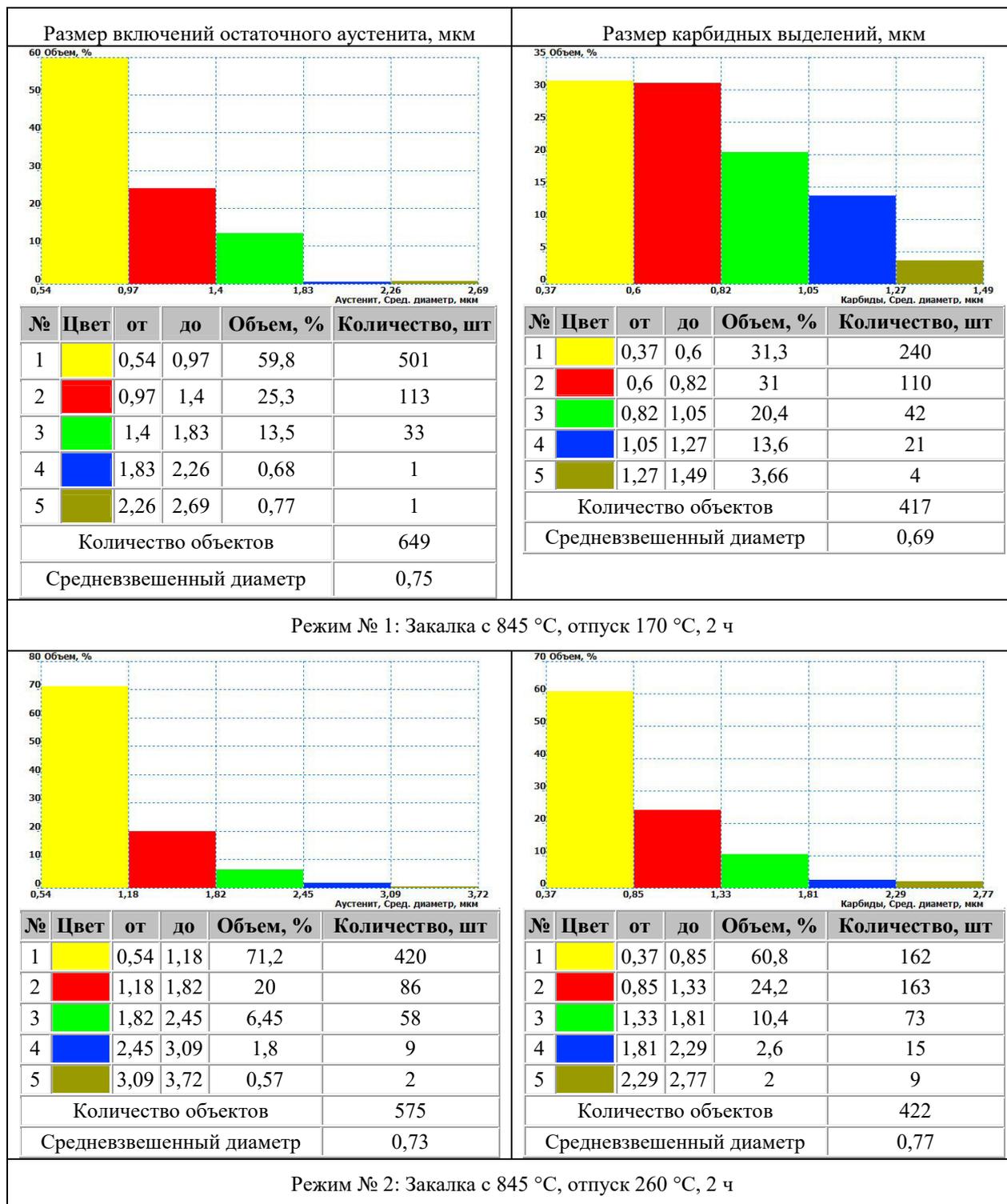
Рис.1. Результаты анализа содержания остаточного аустенита в стали ШХ15 в зависимости от режима температуры отпуска и обработки холодом

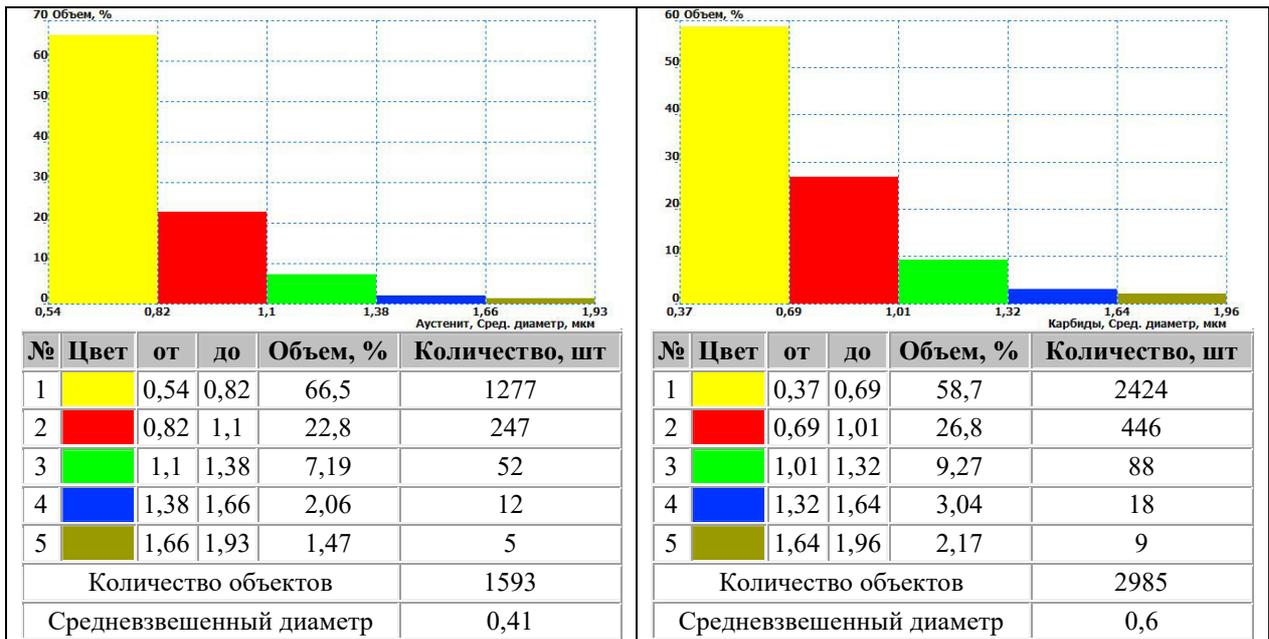
Fig.1. Results of analysis of the content of retained austenite in steel ShKh15 depending on the tempering temperature and cold treatment

Как видно из представленных на рисунке 1 результатов анализа содержания остаточного аустенита, его наименьшее содержание (1,06 об. %) наблюдается в случае термообработки по режиму № 4 – закалка с 845 °С, обработка холодом -60 °С, 24 ч, отпуск 260 °С, 2 ч. Во всех остальных случаях содержание оста-

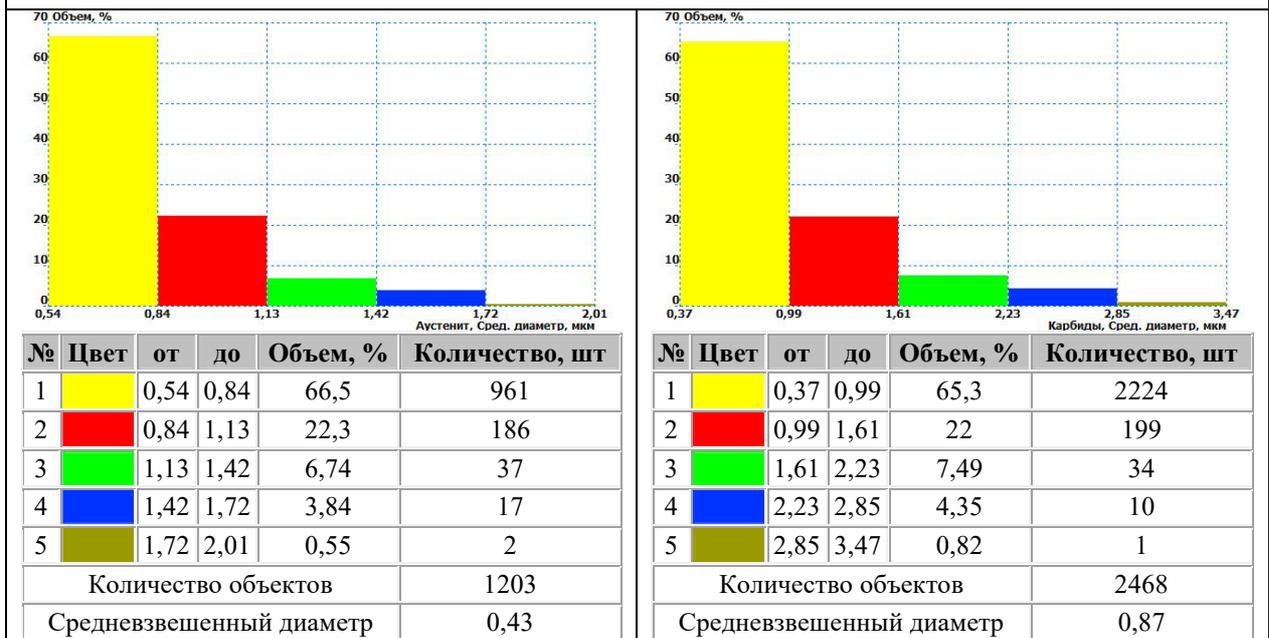
точного аустенита находится в пределах от 1,44 об. % до 2,21 об. %.

Результаты сравнительного анализа среднего приведенного диаметра частиц остаточного аустенита и карбидных выделений представлены на рисунке 2.

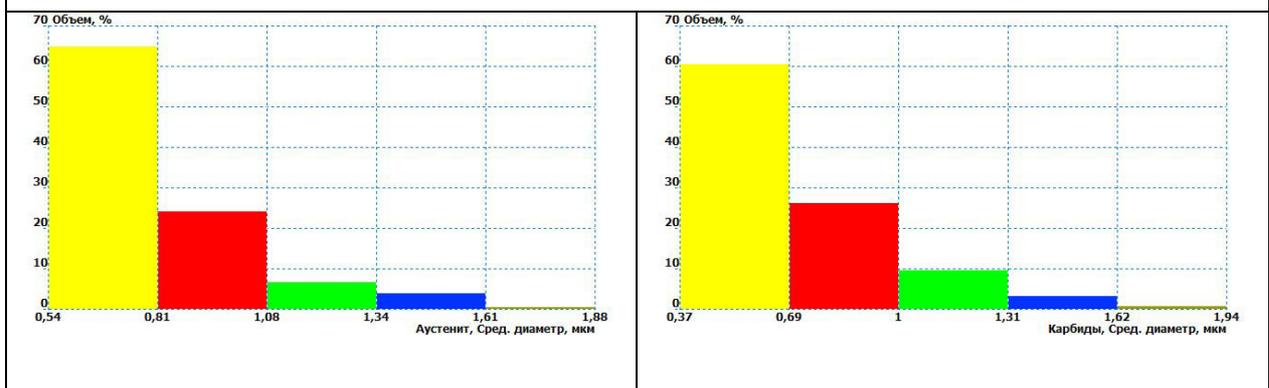




Режим № 3: Закалка с 845 °С, обработка холодом -60 °С, 24 ч, отпуск 170 °С, 2 ч



Режим № 4: Закалка с 845 °С, обработка холодом -60 °С, 24 ч, отпуск 260 °С, 2 ч



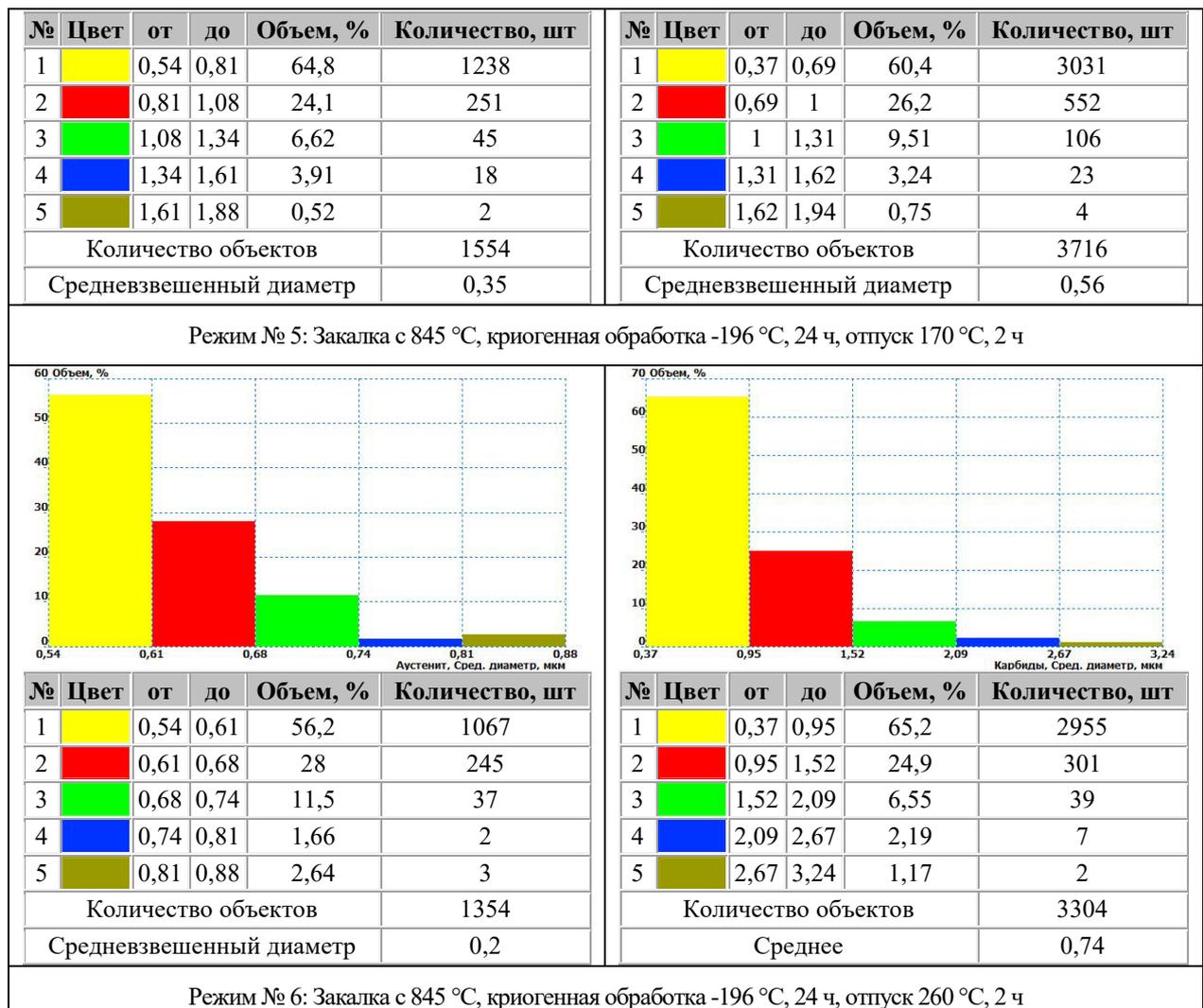


Рис.2. Сравнение средневзвешенных диаметров карбидных и аустенитных включений в стали ШХ15 в зависимости от режима температуры отпуска и обработки холодом

Fig.2. Comparison of weighted average diameters of carbide and austenite inclusions in steel ShKh15 depending on the tempering temperature and cold treatment

Как видно из приведенных на рисунке 2 диаграмм и данных, режим температура отпуска и наличие обработки холодом либо криогенной обработки в значительной степени оказывают влияние прежде всего на размер и содержание аустенитных включений: при традиционной термообработке, заключающейся в закалке и отпуске, средневзвешенный размер аустенитных включений составляет 0,73-0,75 мкм при средневзвешенном количестве аустенитных включений – порядка 46 000 шт/мм². В случае обработки холодом при температуре -60 °С в качестве продолжения процесса закалки, средневзвешенный диаметр аустенитных включений уменьшается до 0,42 мкм, а количество аустенитных включений – увеличивается

до 107 500 шт/мм². В случае замены обработки холодом на криогенную обработку, средневзвешенный размер аустенитных включений уменьшается до 0,28 мкм, тогда как плотность включений незначительно увеличивается до 111 800 шт/мм². При этом повышение температуры отпуска закономерно понижает количество аустенитных включений. Средневзвешенный диаметр карбидных включений при изменении условий термообработки изменяется не так кардинально, оставаясь практически инвариантным к условиям термообработки и незначительно реагируя на температуру отпуска. Однако количество карбидных выделений в случае введения обработки холодом при -60 °С, увеличивается в среднем в 6,5 раза по сравнению

традиционной термообработкой. Замена обработки холодом на криогенную обработку приводит к увеличению плотности частиц выделенных карбидов в 8,4 раза по сравнению с традиционной термообработкой, состоящей из закалки и отпуска.

Заключение

Исходя из проведенного анализа влияния режимов термической обработки на структурно-фазовое состояние стали ШХ15, можно прийти к следующим выводам:

1. Независимо от применяемого режима термообработки, содержание остаточного аустенита регламентируется, прежде всего, температурой нагрева под закалку, а также температурой отпуска.

2. Стимуляция мартенситного превращения путем обработки холодом либо криогенной обработки приводит к дроблению аустенитных включений, незначительно снижая при этом общее содержание остаточного аустенита.

3. Размер карбидных включений в случае стимуляции мартенситного превращения путем обработки холодом либо криогенной обработки можно считать инвариантным, при этом общее количество частиц карбидных выделений увеличивается в 6,5 и в 8,4 раза соответственно в случае обработки холодом при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и криогенной обработке при $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с традиционной термической обработкой.

4. Определяющее влияние на комплекс механических свойств (прочность, ударная вязкость и твердость) термообработанной по разным режимам стали ШХ15, согласно анализу механических свойств будет оказывать соотношение между количеством остаточного аустенита и карбидных выделений, а также соотношение их размерных факторов.

5. Исходя из вышеприведенных доводов, логично ввести некий комплексный параметр, определяющий требуемые механические свойства и при этом объединяющий соотношение размеров остаточного аустенита и карбидных выделений, при этом определяемый в свою очередь, через параметры термической обработки.

Список литературы

1. Земляков С.А., Зенин М.Н., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В. и др. Оценка влияния

режимов термической обработки с использованием отрицательных температур на механические свойства стали ШХ15. Часть I: влияние режимов термообработки на твердость, прочность и ударную вязкость // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2024. Т. 21, № 1. С. 82–90.

2. 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.

3. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы // *Ползуновский вестник*. 2020. № 3. С. 102–105.

4. 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.

5. Гурьев А.М., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов С.Г. Выявление особенностей морфологии и фазового состава сталей методами специального металлографического травления // В сб. тезисов XVI Международной школы-семинара «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах». 2020. С. 83–84.

6. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Алонцева Д.Л., Иванова Т.Г., Гурьев А.М. Взаимосвязь химического состава насыщающей среды и диффузионного покрытия на сталях 45 и 45Л // *Письма о материалах*. 2014. Т. 4, № 3(15). С. 179–181.

Информация об авторах

С. А. Земляков – кандидат технических наук, главный металлург, ООО УК «Алтайский завод прецизионных изделий», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет.

М. Н. Зенин – аспирант, инженер, младший научный сотрудник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, заведующий лабораторией микроскопии, Алтайский государственный технический университет

им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет.

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет, Чжэцзян Бриллиант Холодильное Оборудование Ко., ООО.

Е. В. Черных – кандидат физико-математических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, профессор Уханьского текстильного университета.

Д. И. Зюзин – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

References

1. Zemlyakov, S. A., Zenin, M. N., Ivanov, S. G., Guryev, M. A. & Chernykh, E. V. et al. (2024). Estimation of the influence of heat treatment modes using negative temperatures on the mechanical properties of ShKh15 steel. Part I: the influence of heat treatment modes on hardness, strength and toughness. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(1), 82–90. (In Russ.).
2. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Zemlyakov, S. A., Gur'yev, M. A. & Romanenko, V. V. (2020). Osobennosti metodiki podgotovki obraztsov dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoy fazy stali Kh12F1 posle tsementatsii v vakuume s primeneniym programmnoy kompleksa "Thixomet PRO". *Polzunovskiy vestnik*, (2), 165–168. (In Russ.).
3. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Zemlyakov, S. A. & Gur'yev, M. A. (2020). Metodika probopodgotovki obraztsov vysokolegirovannykh staley dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoy fazy. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 102–105. (In Russ.).
4. Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Gur'yev, A. M. & Romanenko, V. V. (2020). Fazovyy analiz

boridnykh kompleksnykh diffuzionnykh sloyev na uglerodistykh stalyakh pri pomoshchi tsvetnogo travleniya. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(1), 74–77. (In Russ.).

5. Gur'yev, A. M., Gur'yev, M. A., Zemlyakov, S. A. & Ivanov, S. G. (2020). Vyyavleniye osobennostey morfologii i fazovogo sostava staley metodami spetsial'nogo metallograficheskogo travleniya. *V sb. tezisov XVI Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Evolutsiya defektnykh struktur v kondensirovannykh sredakh»*, 83–84. (In Russ.).

6. Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Alontseva, D. L., Ivanova, T. G. & Gur'yev, A. M. (2014). Vzaimosvyaz' khimicheskogo sostava nasyshchayushchey sredy i diffuzionnogo pokrytiya na stalyakh 45 i 45L. *Pis'ma o materialakh*, 4(3(15)), 179–181. (In Russ.).

Information about the authors

S. A. Zemlyakov – Candidate of Technical Sciences, Chief Metallurgist, LLC UK «Altai Precision Products Plant», I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University.

M. N. Zenin – Graduate Student, Engineer, Junior Researcher, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

S. G. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Associate Professor, Head of the Laboratory of Microscopy, I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University.

M. A. Guryev – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd.

E. V. Chernykh – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

A. M. Guryev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department, I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University.

D. I. Ziuzin – Graduate Student, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; одобрена после рецензирования 29.04.2024; принята к публикации 02.05.2024.

The article was received by the editorial board on 04 Apr. 24; approved after reviewing 29 Apr. 24; accepted for publication 02 May 24.