

Научная статья

УДК 669-156.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29110>



*И.В. Теплухина¹, А.В. Батасов¹ ✉, К.К. Ованесьян¹,
С.А. Вологжанина², И.А. Гречихина², В.В. Анисимова²*

¹ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" – Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей", Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ aleksandr-batasov@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ РАСПАДА АУСТЕНИТА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ В НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ МАРКИ 09Г2СА-А ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Аннотация. В работе представлены результаты исследования формирования структуры при непрерывном охлаждении в низколегированной стали марки 09Г2СА-А, используемой при производстве крупногабаритных поковок для энергетического машиностроения. На основании результатов дилатометрического анализа, исследований изменения твердости и структуры стали после охлаждения с различными скоростями построена термокинетическая диаграмма (ТКД) распада переохлажденного аустенита, которая является базовым элементом для создания технологии термической обработки крупногабаритных поковок, обеспечивающей получение однородных механических свойств за счет контролируемого управления процессами структурообразования во всем объеме закаливаемой заготовки. Установлен интервал скоростей охлаждения, при котором обеспечивается отсутствие в структуре стали после закалки таких структурных составляющих как перлит или высокотемпературный бейнит, оказывающих неблагоприятное влияние на сопротивление хрупкому разрушению стали. Материалы статьи представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2022», проходившей в Санкт-Петербурге 21–25 ноября 2022 года.

Ключевые слова: малоуглеродистая низколегированная сталь, распад аустенита, скорость охлаждения, фазовые превращения, структура, термокинетическая диаграмма.

Для цитирования:

Теплухина И.В., Батасов А.В., Ованесьян К.К. и др. Особенности распада аустенита и закономерности формирования структуры в низколегированной стали марки 09Г2СА-А при непрерывном охлаждении // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. С. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29110>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29110>

I.V. Teplukhina¹, A.V. Batasov¹ ✉, K.K. Ovanesyan¹,
S.A. Vologzhanina², I.A. Grechikhina², V.V. Anisimova²

¹ National research center "Kurchatov institute" – Central research institute of structural materials "Prometey", St. Petersburg, Russia;

² Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

✉ aleksandr-batasov@yandex.ru

FEATURES OF AUSTENITE DECAY AND PATTERNS OF STRUCTURE FORMATION IN LOW-ALLOY STEEL GRADE 09G2SA-A UNDER CONTINUOUS COOLING

Abstract. The paper presents the results of a study of structure formation during continuous cooling in low-alloy steel grade 09G2SA-A used in the production of large-sized forgings for power engineering. Based on the results of dilatometric analysis, studies of changes in the hardness and structure of steel after cooling at different rates, a thermokinetic diagram (TKD) was constructed for the decomposition of supercooled austenite. The TKD is the basic element for creating a heat treatment technology for large-sized forgings that provides uniform mechanical properties due to controlled management of structure formation processes in the entire volume of the hardened workpiece. The studies established the interval of cooling rates, which ensures the absence of such structural components as pearlite or high-temperature bainite in the steel structure after hardening to prevent their adverse effect on the resistance to brittle fracture of the steel. The materials of the article were presented at the International Scientific and Practical Conference "Advanced Engineering Technologies AET 2022" held in St. Petersburg on November 21–25, 2022.

Keywords: low-carbon low-alloy steel, austenite decay, cooling rate, phase transformations, structure, thermokinetic diagram.

Citation:

I.V. Teplukhina, A.V. Batasov, K.K. Ovanesyan, etc., Features of austenite decay and patterns of structure formation in low-alloy steel grade 09G2SA-A under continuous cooling, *Global Energy*, 29 (01) (2023) 170–180, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29110>

Введение. Для изготовления современного теплоэнергетического оборудования требуются крупногабаритные заготовки типа плит с определенным уровнем механических свойств и сопротивления хрупкому разрушению. Формирование свойств таких заготовок происходит при термической обработке, состоящей, как правило, из закалки и отпуска. При этом свойства металла заготовок определяются структурой, которая формируется в процессе термообработки.

Одним из требований к качеству металла крупногабаритных заготовок для теплоэнергетического оборудования является однородность механических свойств по сечению, которая зависит от особенностей распада аустенита и формирования структуры стали при непрерывном охлаждении в каждой точке сечения заготовки.

Для изготовления трубных досок подогревателей высокого давления (ПВД) атомных станций в настоящее время применяются низколегированные свариваемые стали 22К и 09Г2СА-А. Сталь марки 09Г2СА-А, разработанная НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» [1–3], обеспечивает более низкую критическую температуру хрупкости $T_{к0}$ по сравнению с применяемой сталью 22К при одинаковом уровне механических характеристик. Это позволяет избежать нагрева воды при проведении гидравлических испытаний оборудования как на заводе-изготовителе оборудования, так и на площадке эксплуатирующей организации.

Следует отметить, что производство крупногабаритных заготовок для трубных досок ПВД является сложной технической проблемой в силу того, что при закалке заготовок с толщиной стенки свыше 600 мм имеется значительный градиент скоростей охлаждения по сечению, что оказывает влияние на формирование структуры, и, следовательно, свойств, в каждой конкретной точке сечения заготовки.

Для создания технологии термической обработки, обеспечивающей однородность механических свойств по сечению крупногабаритной заготовки за счет контролируемого управления процессами структурообразования во всем объеме закаливаемой заготовки необходимо иметь данные по кинетике распада переохлажденного аустенита и учитывать закономерности структурообразования в стали при непрерывном охлаждении стали. Качественную и количественную оценки превращений, протекающих в стали при охлаждении, дают термокинетические диаграммы (ТКД) распада переохлажденного аустенита, построение которых основано на результатах обработки дилатометрических кривых охлаждения.

Цель данной работы – построение ТКД и последующее исследование особенностей кинетики распада аустенита и структурообразования при непрерывном охлаждении стали марки 09Г2СА-А.

Материал и методы исследования

Построение ТКД проводилось на основании результатов дилатометрических исследований. Характерные области образования различных структурных составляющих на ТКД определялись с помощью дополнительных исследований – металлографических исследований структуры и твердости стали после охлаждения с различными скоростями.

Исследование проводилось на закалочно-деформационном дилатометре DIL 805.PRO фирмы ВАНР (Германия) с использованием образцов размером $\varnothing 5 \times 10$ мм, изготовленных из металла крупногабаритной заготовки плиты из стали марки 09Г2СА-А состава: С – 0,08%, Мп – 1,33%, Si – 0,59%, Cr – 0,18%, Ni – 0,24%, Cu – 0,16%.

Температура аустенитизации образцов составляла 1000 °С, выдержка при температуре аустенитизации – 20 минут, скорости охлаждения варьировались в диапазоне от 0,05 до 100 °С/с. При каждой скорости испытывалось по 2 образца.

Анализ микроструктуры дилатометрических образцов после различных скоростей охлаждения проводился на оптическом микроскопе Neophot при увеличениях $\times 200$ и $\times 500$. Травление шлифов проводилось в 10% спиртовом растворе азотной кислоты.

Измерение твердости получаемых структур после различных скоростей охлаждения проводилось на микротвердомере «ПМТ-3» с цифровой видеокамерой и нагрузке 200 г.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты дилатометрических исследований

При проведении дилатометрических исследований были определены критические точки стали марки 09Г2СА-А: $A_{C1} = 735$ °С, $A_{C3} = 915$ °С.

Анализ кривых охлаждения стали 09Г2СА-А показал, что в интервале скоростей 0,05÷0,5 °С/с наряду с высокотемпературным выделением полигонального феррита наблюдается бейнитное превращение, отделенное от первого превращения областью устойчивости аустенита (рис. 1). Это связано с тем, что легирующие элементы, в особенности Мп и Cr, замедляют диффузионное превращение, поэтому даже при очень малых скоростях превращение не протекает полностью. Оставшийся аустенит при дальнейшем переохлаждении до 630÷590 °С претерпевает бейнитное превращение. Судя по величине объемного эффекта превращения, количество образующегося бейнита невелико (порядка 10%).

Это типично для малоуглеродистых низколегированных сталей, у которых при охлаждении с малыми скоростями температурные интервалы диффузионного и бейнитного превращений разделены [4–7].

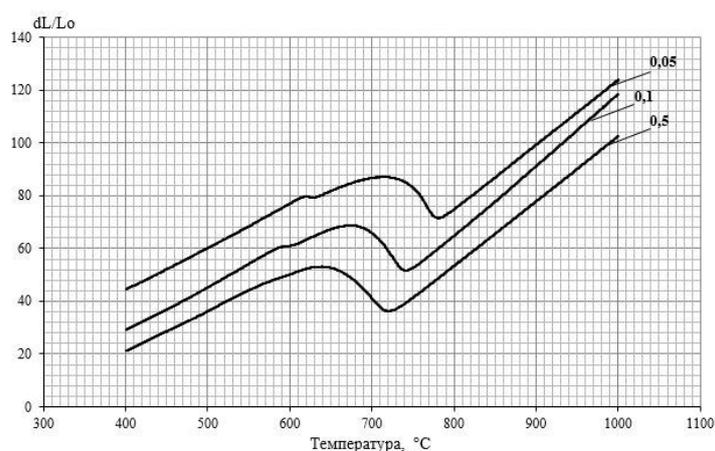


Рис. 1. Кривые охлаждения образцов из стали марки 09Г2СА-А: 1 – 0,05 °C/c; 2 – 0,1 °C/c; 3 – 0,5 °C/c
 Fig. 1. Cooling curves of specimens made of steel grade 09G2SA-A: 1 – 0,05 °C/s; 2 – 0.1 °C/s; 3 – 0.5 °C/s

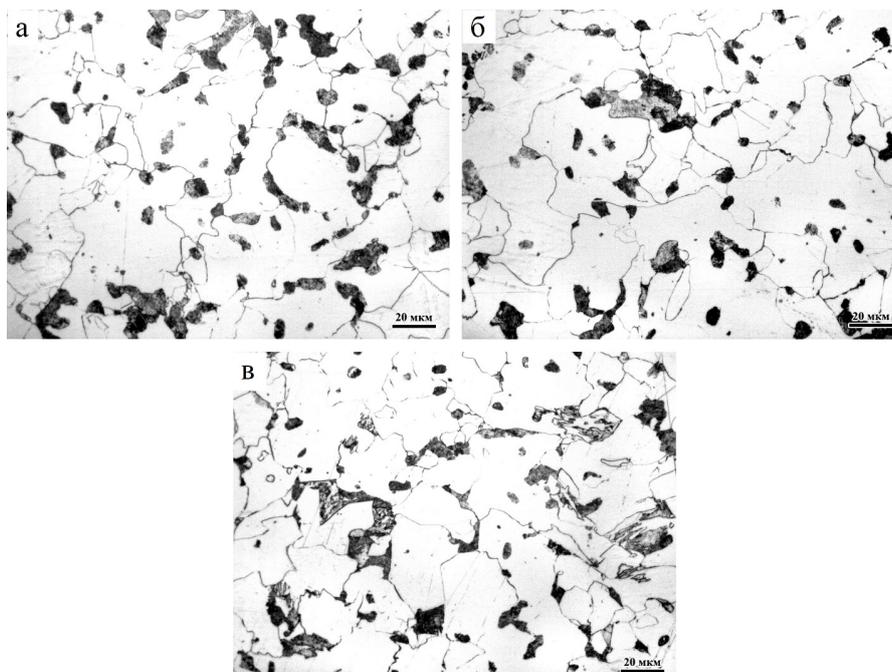


Рис. 2. Микроструктура стали 09Г2СА-А после охлаждения со скоростью:
 а) 0,05 °C/c, б) 0,1 °C/c, в) 0,5 °C/c (×500)

Fig. 2. The microstructure of steel 09G2SA-A after cooling at a rate of: a) 0.05 °C/s, b) 0.1 °C/s, c) 0.5 °C/s (×500)

При более высоких скоростях охлаждения оба превращения накладываются друг на друга по температурной шкале. При скоростях выше 0,05 °C/c на дилатометрических кривых наблюдается один интервал увеличения объема, связанного с $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением.

Результаты исследования микроструктуры

Для выделения на ТКД областей образования различных структурных составляющих (областей взаимного существования феррита, перлита, бейнита и мартенсита) был проведен анализ микроструктуры образцов после охлаждения с различными скоростями. На рис. 2 представлена микроструктура стали 09Г2СА-А после охлаждения в интервале скоростей 0,05–0,5 °C/c.

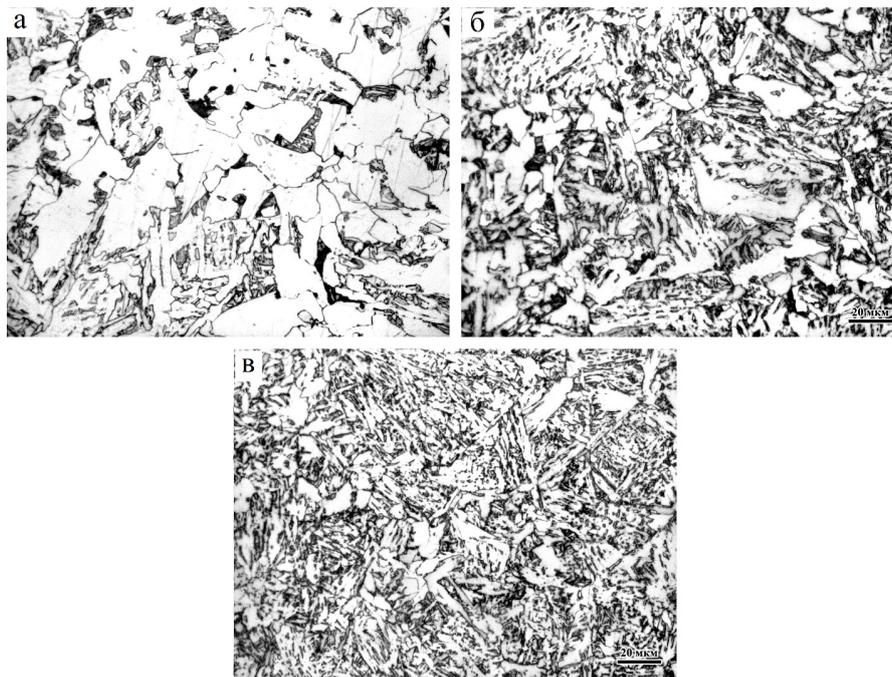


Рис. 3. Микроструктура стали 09Г2СА-А после охлаждения со скоростью: а) 1 °С/с, б) 5 °С/с, в) 10 °С/с (×500)
 Fig. 3. The microstructure of steel 09G2SA-A after cooling at a rate of: a) 1 °C/s, b) 5 °C/s, c) 10 °C/s (×500)

Как видно из рис. 2, при малых скоростях охлаждения структура стали состоит в основном из феррита, небольшого количества перлита и участков бейнита, внешне напоминающего строение высокотемпературного (верхнего) бейнита, характерного для среднеуглеродистых сталей.

Это связано с тем, что при медленном охлаждении в процессе образования феррита, непрерывная часть аустенита непрерывно обогащается углеродом. По мере увеличения скорости в этом интервале количество бейнита в структуре увеличивается, при этом его морфология начинает приобретать игольчатую форму.

Так как малое количество перлитной составляющей не оказывает особого влияния на ход дилатометрических кривых, его присутствие было определено методами оптической металлографии. В связи с этим на термокинетической диаграмме область выделения перлита нанесена штриховой линией (рис. 6).

По мере увеличения скорости охлаждения развитие диффузионного превращения существенно тормозится, что проявляется в уменьшении содержания полигонального феррита в структуре, практически полном исчезновении перлита и увеличении содержания бейнитной составляющей (рис. 3), которая приобретает реечную и глобулярную морфологию, характерную для низкоуглеродистых сталей.

При скорости охлаждения выше 10 °С/с феррит в структуре практически не образуется (присутствуют отдельные зерна). Структура представляет собой бейнит с единичными зёрнами феррита.

В интервале скоростей охлаждения 20÷100 °С/с наблюдается постепенное подавление бейнитного превращения и увеличение доли мартенситной составляющей в структуре. При скорости 100 °С/с структура на 90% состоит из мартенсита (рис. 4).

При скорости охлаждения 50 °С/с структура стали 09Г2СА-А представляет собой мартенсит с четко очерченными иглами и отдельными зёрнами бейнита (рис. 4).

Для уточнения границ существования фаз феррита, бейнита и мартенсита было проведено исследование зависимости твердости получаемых структур от скорости охлаждения. Результаты исследования представлены на рис. 5.

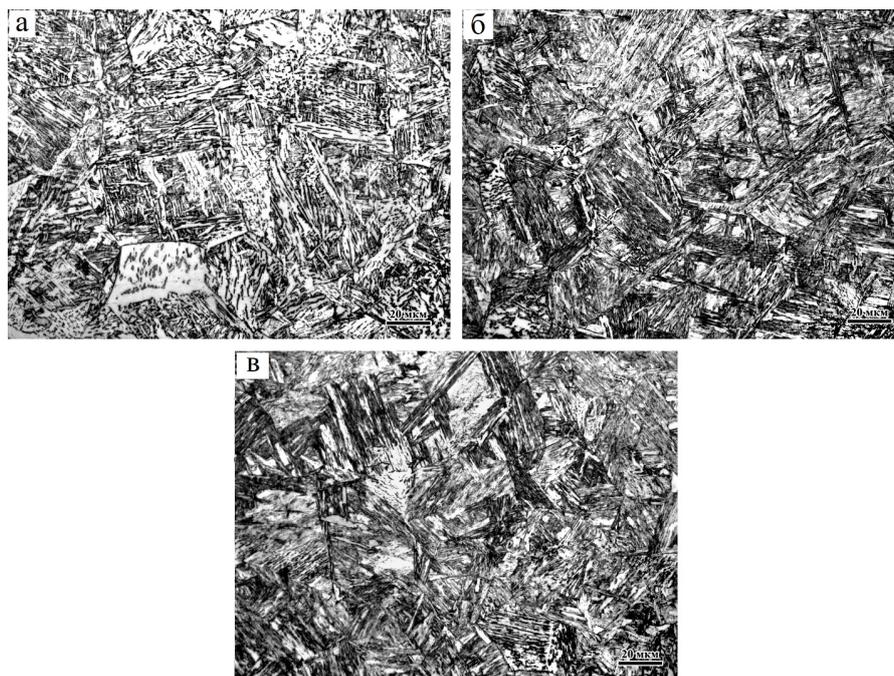


Рис. 4. Микроструктура стали 09Г2СА-А после охлаждения со скоростью: а) 20 °С/с, б) 50 °С/с, в) 100 °С/с ($\times 500$)
 Fig. 4. The microstructure of steel 09G2SA-A after cooling at a rate of: a) 20 °C/s, b) 50 °C/s, c) 100 °C/s ($\times 500$)

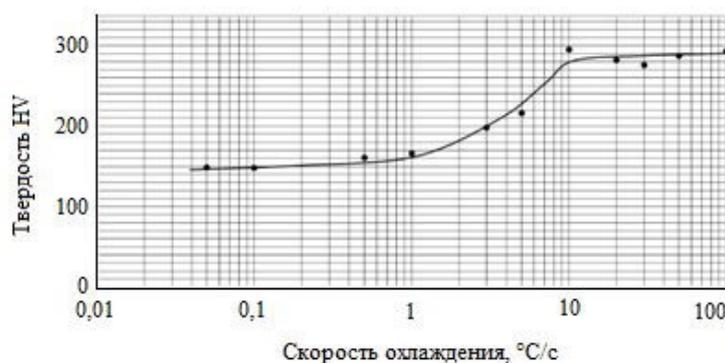


Рис. 5. Изменение твердости дилатометрических образцов в зависимости от скорости
 Fig. 5. Change in the hardness of dilatometric samples depending on the speed

При малых скоростях охлаждения (до 1 °C/s) твердость продуктов распада аустенита практически не изменяется (незначительно увеличивается от 149 HV при скорости охлаждения 0,05 °C/s до 160 HV при скорости охлаждения 1 °C/s). Небольшое увеличение твердости связано с тем, что при скорости охлаждения 0,5 °C/s в структуре стали появляется бейнит, имеющий реечное и глобулярное строение и обладающий большей прочностью и твердостью по сравнению с высокотемпературным бейнитом.

Повышение значений твердости в интервале скоростей охлаждения от 1 °C/s до 10 °C/s связано с постепенным уменьшением ферритной составляющей в структуре стали и увеличения количества бейнитной составляющей.

При увеличении скорости охлаждения свыше 10 °C/s твердость стали изменяется незначительно, достигая при этом максимальных значений (280÷290 HV). В структуре стали феррит

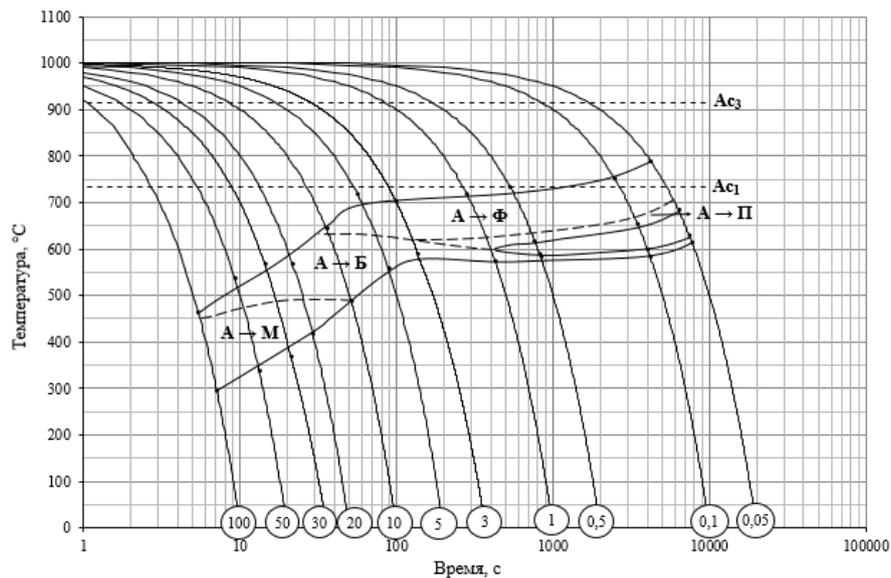


Рис. 6. Термокинетическая диаграмма распада аустенита стали марки 09Г2СА-А
 Fig. 6. Thermokinetic diagram of the decomposition of austenite steel grade 09G2SA-A

отсутствует, образуется низкотемпературный нижний бейнит, имеющий реечное и глобулярное строение, и увеличивается количество мартенситной составляющей с ростом скорости охлаждения. Связано это с тем, что в малоуглеродистой стали твердость мартенсита и реечного бейнита различаются незначительно.

Таким образом, полученные результаты исследования зависимости твердости получаемых структур от скорости охлаждения полностью коррелируют с результатами металлографических исследований.

На основании комплексных исследований, включающих дилатометрический анализ, металлографическое исследование структуры и твердости образцов из стали марки 09Г2СА-А после различных скоростей охлаждения построена термокинетическая диаграмма распада аустенита стали марки 09Г2СА-А (рис. 6).

Известно, что наличие в структуре таких структурных составляющих, как перлит или высокотемпературный бейнит, оказывают неблагоприятное влияние на сопротивление хрупкому разрушению стали. В среднеуглеродистых конструкционных сталях, из которых изготавливаются ответственные изделия, наличие в структуре верхнего бейнита не допускается. В малоуглеродистых сталях верхний бейнит обладает худшим сопротивлением хрупкому разрушению по сравнению с нижним бейнитом при сравнимой прочности [8–15].

Как показали проведенные исследования, в стали марки 09Г2СА-А в интервале скоростей охлаждения $0,05 \div 0,1$ °C/c образуется незначительное количество перлита и высокотемпературного верхнего бейнита. Несмотря на то, что суммарное содержание этих структурных составляющих невелико, они могут повлиять на уровень ударной вязкости стали и сопротивление хрупкому разрушению металла заготовок. Поэтому нежелательно присутствие этих структурных составляющих в стали. Изменение морфологии бейнита (образование реечного и гранулярного бейнита) приводит к повышению сопротивления хрупкому разрушению низкоуглеродистой стали.

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сказать, что для обеспечения высокого сопротивления хрупкому металлу крупногабаритных заготовок из стали марки 09Г2СА-А при закалке скорости охлаждения должны быть выше $0,5$ °C/c в любой точке сечения заготовки с тем, чтобы обеспечить формирование ферритно-бейнитной (скорости охлаждения

0,5÷10 °С/с) или бейнитно-мартенситной (скорости охлаждения более 10 °С/с) структуры по всему сечению термообрабатываемой заготовки. При этом в структуре стали должен отсутствовать верхний бейнит и перлит.

Заключение

Изучена кинетика распада аустенита и закономерности формирования структуры в низколегированной стали марки 09Г2СА-А при непрерывном охлаждении с температуры 1000 °С со скоростями 0,05÷100 °С/с. Установлено, что для обеспечения высокого сопротивления хрупкому разрушению при закалке заготовок из стали марки 09Г2СА-А скорости охлаждения в любой точке сечения термообрабатываемой заготовки должны быть выше 0,5 °С/с с целью формирования ферритно-бейнитной или бейнитно-мартенситной структуры по всему сечению.

Материалы статьи представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2022», проходившей в Санкт-Петербурге 21–25 ноября 2022 года.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Карзов, Г.П., Быковский Н.Г., Ованесьян К.К., Оленин М.И., Калиничева Н.В. Материаловедческие аспекты освоения производства изделий атомной техники из стали марки 09Г2СА-А // Вопросы материаловедения. 2014. № 4 (80). С. 13–25.
- [2] Горынин И.В., Карзов Г.П., Бережко Б.И., Быковский Н.Г., Оленин М.И., Калиничева Н.В. Новая сталь для контейнеров с ОЯТ // Безопасность окружающей среды. 2008. № 4. С. 52–55.
- [3] Бережко Б.И., Быковский Н.Г., Оленин М.И., Калиничева Н.В., Евдокимова Н.В., Романов О.Н., Стольный В.И., Бушуев С.В., Сергеев Ю.К. Хладостойкость металлургических полуфабрикатов (листов и поковок) из низкоуглеродистых экономнолегированных кремнемарганцовистых сталей // Вопросы материаловедения. 2007. № 3 (51). С. 43–49.
- [4] Пумпянский Д.А., Смирнов М.А., Журавлёв Л.Г., Пышминцев И.Ю. Влияние скорости охлаждения на структуру низкоуглеродистой трубной стали // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. 2006. № 7. С. 137–140.
- [5] Полецков П.П., Денисов С.В., Никитенко О.А., Чукин Д.М., Гущина М.С. Исследование распада переохлажденного аустенита низкоуглеродистой трубной стали с использованием комплекса GLEEBLE 3500* // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. № 3 (62). С. 235–240.
- [6] Денисов С.В., Завалищин А.Н., Кожевников Е.В., Румянцев М.И. Изменение структуры низколегированной стали в процессе производства // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 3 (43). С. 51–54.
- [7] Козвонин В.А., Шацов А.А., Ряпосов И.В., Закирова М.Г., Генералова К.Н. Структура, фазовые превращения, механические свойства и хладостойкость низкоуглеродистых мартенситных сталей // Физика металлов и материаловедение. 2016. № 8. С. 862–870.
- [8] Панов Д.О., Спивак Л.В. Исследование распада переохлажденного аустенита конструкционной стали с использованием дилатометрии высокого разрешения // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2020. № 1 (22). С. 5–14.
- [9] Окишев К.Ю. Расчет диаграмм изотермического распада аустенита в конструкционных сталях // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2020. № 2 (22). С. 82–89.
- [10] Morawiec M., Skowronek A., Krol M., Grajcar A. Dilatometric analysis of the austenite decomposition in undeformed and deformed low-carbon structural steel. Materials, 13 (23) (2020) 1–13.
- [11] Юрченко А.Н., Мариева М.А., Гребенкин Р.Д., Симонов Ю.Н. Определение критических значений температуры АС1 и АС3 в сталях системы легирования Х2Г2С2МФ с помощью дилатометрии

ческого метода и метода пробных закалок // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2019. № 3 (21). С. 85–92.

[12] **Jenicek S., Opatova K., Kucerova L., Vorel I.** The progress transformation during austempering in connection with the alloying of unconventional AHS steels. *Manufacturing technology*, 22 (3) (2022) 288–296.

[13] **Pashangeh S., Somani M.C., Ghasemi Banadkouki S.S., Karimi Zarchi H.R., Kaikkonen P., Porter D.A.** On the decomposition of austenite in a high-silicon medium-carbon steel during quenching and isothermal holding above and below the Ms temperature. *Materials Characterization*, 162 (2020).

[14] **An B., Zhang C., Gao G., Gui X., Tan Z., Misra R.D.K., Yang Z.** Experimental and theoretical analysis of multiphase microstructure in a newly designed MnSiCrC quenched and partitioned steel to promote bainitic transformation: The significant impact on mechanical properties. *Materials science and engineering: A*, 757 (2019) 117–123.

[15] **Zhao H., Wynne B.P., Palmiere E.J.** Effect of austenite grain size on the bainitic ferrite morphology and grain refinement of a pipeline steel after continuous cooling. *Materials characterization*, 123 (2017) 128–136.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТЕПЛУХИНА Ирина Владимировна – *начальник лаборатории, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" – Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей", канд. техн. наук.*
E-mail: teplukhina@yandex.ru

БАТАСОВ Александр Владимирович – *инженер I категории, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" – Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей", без степени.*
E-mail: aleksandr-batasov@yandex.ru

ОВАНЕСЬЯН Константин Константинович – *начальник сектора, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" – Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей", канд. хим. наук.*
E-mail: kovan2303@gmail.com

ВОЛОГЖАНИНА Светлана Антониновна – *профессор, Санкт-Петербургский горный университет, без степени.*
E-mail: svet_spb@mail.ru

ГРЕЧИХИНА Ирина Андреевна – *студент, Санкт-Петербургский горный университет, без степени.*
E-mail: irina.grechikhina99@gmail.com

АНИСИМОВА Виктория Владимировна – *студент, Санкт-Петербургский горный университет, без степени.*
E-mail: vikaanis15@mail.ru

REFERENCES

[1] **G.P. Karzov, N.G. Bykovsky, K.K. Ovanesyan, M.I. Olenin, N.V. Kalinicheva,** Material science aspects of mastering the production of nuclear equipment products from steel grade 09G2SA-A. *Voprosy materialovedeniya*, 4 (80) (2014) 13–25.

[2] **I.V. Gorynin, G.P. Karzov, B.I. Berezko, N.G. Bykovsky, M.I. Olenin, N.V. Kalinicheva,** New steel for SNF casks. *Bezopasnost okruzhayushchey sredy*, 4 (2008) 52–55.

- [3] **B.I. Berezhko, N.G. Bykovsky, M.I. Olenin, N.V. Kalinicheva, N.V. Evdokimova, O.N. Romanov, V.I. Stolny, S.V. Bushuev, Yu.K. Sergeev**, Cold resistance of metallurgical semi-finished products (sheets and forgings) from low-carbon sparingly alloyed silicon-manganese steels. *Voprosy materialovedeniya*, 3 (51) (2007) 43–49.
- [4] **D.A. Pumpyansky, M.A. Smirnov, L.G. Zhuravlev**, Effect of cooling rate on low carbon pipe steel, *Vestnik YuUrGU. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 7 (2006) 137–140.
- [5] **P.P. Poletskov, S.V. Denisov, O.A. Nikitenko, D.M. Chukin, M.S. Gushchina**, Decay of supercooled austenite of low-carbon pipe steel with the use of GLEEBLE 3500 complex. *Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya*, 3 (62) (2019) 235–240.
- [6] **S.V. Denisov, A.N. Zavalishchin, E.V. Kozhevnikova, M.I. Rumyantsev**, Material science aspects of mastering the production. *Vestnik Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*, 3 (43) (2013) 51–54.
- [7] **V.A. Kozvonin, A.A. Shatsov, I.V. Ryapov, M.G. Zakirova, K.N. Generalova**, Structure, phase transformations, mechanical properties and cold resistance of low-carbon martensitic steels. *Physics of metals and metal science*, 8 (2016) 862–870.
- [8] **D.O. Panov, L.V. Spivak**, Issledovaniye raspada pereokhlazhdenogo austenita konstruktsionnoy stali s ispolzovaniyem dilatometrii vysokogo razresheniya // *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. 2020. № 1 (22). S. 5–14.
- [9] **K.Yu. Okishev**, Raschet diagramm izotermicheskogo raspada austenita v konstruktsionnykh stalyakh // *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. 2020. № 2 (22). S. 82–89.
- [10] **M. Morawiec, A. Skowronek, M. Krol, A. Grajcar**, Dilatometric analysis of the austenite decomposition in undeformed and deformed low-carbon structural steel. *Materials*, 13 (23) (2020) 1–13.
- [11] **A.N. Yurchenko, M.A. Mariyeva, R.D. Grebenkin, Yu.N. Simonov**, Opredeleniye kriticheskikh znacheniy temperatury AS1 i AS3 v stalyakh sistemy legirovaniya Kh2G2S2MF s pomoshchyu dilatometricheskogo metoda i metoda probnykh zakalok // *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. 2019. № 3 (21). S. 85–92.
- [12] **S. Jenicek, K. Opatova, L. Kucerova, I. Vorel**, The progress transformation during austempering in connection with the alloying of unconventional AHS steels. *Manufacturing technology*, 22 (3) (2022) 288–296.
- [13] **S. Pashangeh, M.C. Somani, S.S. Ghasemi Banadkouki, H.R. Karimi Zarchi, P. Kaikkonen, D.A. Porter**, On the decomposition of austenite in a high-silicon medium-carbon steel during quenching and isothermal holding above and below the Ms temperature. *Materials Characterization*, 162 (2020).
- [14] **B. An, C. Zhang, G. Gao, X. Gui, Z. Tan, R.D. K. Misra, Z. Yang**, Experimental and theoretical analysis of multiphase microstructure in a newly designed MnSiCrC quenched and partitioned steel to promote bainitic transformation: The significant impact on mechanical properties. *Materials science and engineering: A*, 757 (2019) 117–123.
- [15] **H. Zhao, B.P. Wynne, E.J. Palmiere**, Effect of austenite grain size on the bainitic ferrite morphology and grain refinement of a pipeline steel after continuous cooling. *Materials characterization*, 123 (2017) 128–136.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Irina V. TEPLUKHINA – *National research center "Kurchatov institute" – Central research institute of structural materials "Prometey"*.
E-mail: teplukhina@yandex.ru

Aleksandr V. BATASOV – *National research center "Kurchatov institute" – Central research institute of structural materials "Prometey"*.
E-mail: aleksandr-batasov@yandex.ru

Konstantin K. OVANESYAN – *National research center "Kurchatov institute" – Central research institute of structural materials "Prometey".*

E-mail: kovan2303@gmail.com

Svetlana A. VOLOGZHANINA – *Saint-Petersburg Mining University.*

E-mail: svet_spb@mail.ru

Irina A. GRECHIKHINA – *Saint-Petersburg Mining University.*

E-mail: irina.grechikhina99@gmail.com

Victoria V. ANISIMOVA – *Saint-Petersburg Mining University.*

E-mail: vikaanis15@mail.ru

Поступила: 22.01.2023; Одобрена: 18.02.2023; Принята: 20.02.2023.

Submitted: 22.01.2023; Approved: 18.02.2023; Accepted: 20.02.2023.