Глобальная энергия. Том 30, № 3, 2024. С. 73–82.
Global Energy, 2024, 30 (3); 73–82.

Научная статья
УДК 621.785-97
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.30306

Г.Н. Теплухин, *В.Г. Теплухин* ✉ ,
Р.В. Кузнецов, *М.М. Радкевич*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ cornfield@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА НА ПОЛОЖЕНИЕ МАРТЕНСИТНОЙ ТОЧКИ В СТАЛЯХ, ЛЕГИРОВАННЫХ НИКЕЛЕМ

Аннотация. Остаточный аустенит является очень важной структурной составляющей, особенно в высоколегированных и высокоуглеродистых сталях. При определенном легировании и термической обработке его количество может составлять до 95–98%. Поэтому существенное значение имеет определение температуры начала мартенситного превращения (мартенситной точки) в зависимости от химического состава. В настоящее время однозначного выражения этой зависимости не существует. Исследователи используют многочисленные расчетные модели и экспериментальные данные. В настоящей работе рассмотрена зависимость мартенситной точки от содержания углеродов в сталях, легированных некарбидообразующим элементом – никелем. В работе использован структурный метод определения мартенситной точки с применением высокотемпературной металлографической установки. Показано, что наибольшее влияние на мартенситную точку никель оказывает в низкоуглеродистых сталях. С повышением содержания углерода влияние никеля ослабевает, а для стали 143Н4 мартенситная точка находится даже выше, чем в углеродистой стали с аналогичным содержанием углерода. Установлено, что при высоком содержании углерода даже при быстром охлаждении происходит графитизация, что и следует считать причиной повышения мартенситной точки. Материалы статьи были представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) AET 2024», проходившей в Санкт-Петербурге 13–16 мая 2024 года.

Ключевые слова: остаточный аустенит, мартенситная точка, содержание углерода, легированная сталь, высокотемпературная металлография, графитизация.

Для цитирования:

Теплухин Г.Н., Теплухин В.Г., Кузнецов Р.В., Радкевич М.М. Влияние углерода на положение мартенситной точки в сталях, легированных никелем // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 73–82. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.30306

© Теплухин Г.Н., Теплухин В.Г., Кузнецов Р.В., Радкевич М.М., 2024. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.30306

G.N. Teplukhin, V.G. Teplukhin ✉,
R.V. Kuznetsov, M.M. Radkevich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ cornfield@yandex.ru

THE EFFECT OF CARBON CONTENT ON THE MARTENSITE START TEMPERATURE IN NICKEL-ALLOYED STEELS

Abstract. Retained austenite is a very important structural component, especially in high-alloy and high-carbon steels. With certain alloying and heat treatment, its amount can be up to 95–98%. Therefore, it is essential to determine the start temperature of the martensitic transformation (martensite point) depending on the chemical composition. At present, there is no definite expression for this dependence. Researchers use numerous calculation models and experimental data. In this paper, the dependence of the martensite point on the carbon content in steels alloyed with a non-carbide-forming element – nickel – is considered. The work uses a structural method for determining the martensite point using a high-temperature metallographic unit. Actually, nickel has the greatest effect on the martensite point in low-carbon steels. With an increase in the carbon content, the effect of nickel weakens, and for steel 143N4, the martensite point is even higher than in carbon steel with a similar carbon content. It was found that at high carbon content, even while rapid cooling, graphitization occurs. It should be considered the reason for the increase in the martensite point. The materials of the article were presented at the International Scientific and Practical Conference "Advanced Engineering Technologies (AET 2024)" held in St. Petersburg on May 13–16, 2024.

Keywords: retained austenite, martensite point, carbon content, alloy steel, high-temperature metallography, graphitization.

Citation:

G.N. Teplukhin, V.G. Teplukhin, R.V. Kuznetsov, M.M. Radkevich, The effect of carbon content on the martensite start temperature in nickel-alloyed steels, Global Energy, 30 (03) (2024) 73–82, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.30306

Введение. Остаточный аустенит является одной из важнейших неравновесных структурных составляющих, образующихся в углеродистых и легированных сталях различного состава и оказывающих значительное влияние на свойства и структурную стабильность. Впервые существование остаточного аустенита было обнаружено в углеродистых сталях. В соответствии с классическими представлениями, отраженными в учебнике А.П. Гуляева, который основывался на работах В.Д. Садовского [1], остаточный аустенит сохраняется в структуре стали при закалке тем больше, чем выше содержание углерода при достижении примерно 0,6% вследствие того, что температура окончания мартенситного превращения становится ниже температуры охлаждающей среды. Аналогичные экспериментальные результаты и графики влияния содержания углерода на температуру начала и окончания мартенситного превращения приводятся и в работах современных исследователей [2]. Аналитически была выведена зависимость количества остаточного аустенита от содержания углерода в углеродистых сталях, известная как формула Койстена–Марбюргера, широко используемая с 1959 г. до сих пор [3, 4].

Известно, что образование остаточного аустенита происходит в сталях и с более низким содержанием углерода при наличии легирующих элементов. Задача построения модели влияния

© G.N. Teplukhin, V.G. Teplukhin, R.V. Kuznetsov, M.M. Radkevich, 2024. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

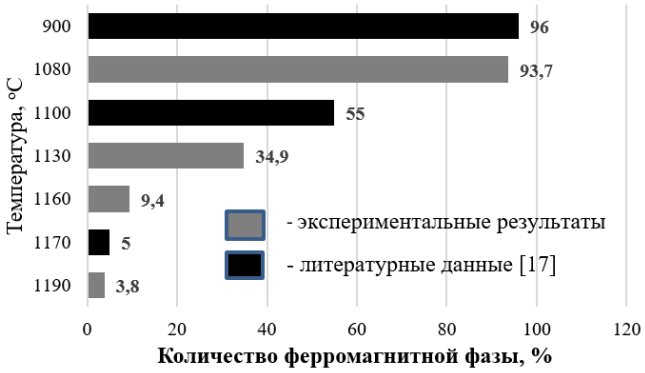

Рис. 1. Влияние температуры закалки на количество мартенсита в стали 95Х18

Fig. 1. Effect of quenching temperature on the amount of martensite in 95C18 steel

химического состава стали на температуры начала мартенситного превращения (мартенситной точки) является актуальной начиная с 1940-х годов [5, 6]. Приводится несколько десятков вариантов аналитической зависимости [7]. Однако на основании литературных данных не удается установить, однозначно ли действуют легирующие элементы на мартенситную точку при различном содержании углерода.

Значительное влияние на количество остаточного аустенита оказывает целый ряд факторов кроме химического состава – скорость охлаждения, размер зерна и состав аустенита при нагреве под закалку [8–10]. Большое внимание уделяется внешним воздействиям, например, влиянию магнитных полей [1, 11, 12]. Но мартенситная точка является наиболее универсальным параметром, определяющим количество остаточного аустенита.

Таким образом, остаточный аустенит может образовываться в сталях совершенно разного назначения и оказывать совершенно разное влияние на механические, технологические и другие свойства. Если для высокоуглеродистых инструментальных сталей логичным является стремление к уменьшению его доли в закаленной стали, то, например, с точки зрения износостойкости присутствие остаточного аустенита в структуре играет положительную роль [13]. Причем особенно важным его влияние на свойства становится в высоколегированных сталях [1, 14, 15].

Авторы настоящей работы, так же как и многие исследователи в России и за рубежом [16–18], проводили экспериментальные исследования в отношении возможности снижения мартенситной точки за счет легирования и термической обработки с целью получения максимального количества остаточного аустенита. В работе [18] была получена сходимость экспериментальных данных, полученных по различным методикам (рис. 1).

При анализе результатов работы [3] отчетливо видно, что экспериментальная зависимость мартенситной точки от содержания хрома качественно отличается для сталей с высоким содержанием углерода при содержании хрома более 9% (рис. 2). Снижение мартенситной точки замедляется или даже прекращается.

В настоящей работе поставлена задача проверки монотонности влияния содержания углерода на положение мартенситной точки в легированной стали. Для того чтобы исключить вероятность подавляющего влияния высокой степени легирования и процессов карбидообразования, сконцентрировав внимание на влиянии углерода, была выбрана группа сталей, легированных некарбидообразующим элементом никелем в относительно небольших количествах.

Материал и методы исследований

Для изучения поставленного вопроса производилось определение мартенситной точки в семи сплавах, легированных никелем (3,85–4,06%), различающихся содержанием углерода (табл. 1).

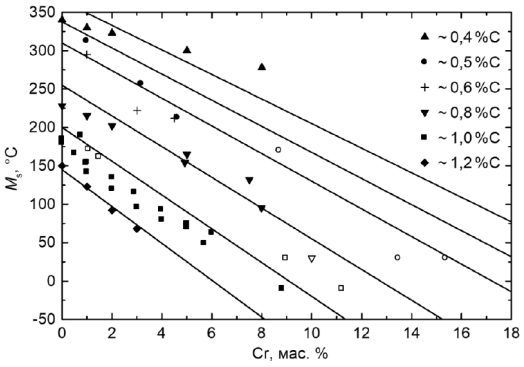

Рис. 2. Мартенситная точка в зависимости от содержания углерода и хрома в аустените [3].
Точки – экспериментальные результаты разных авторов, линии – результаты расчета по формуле

Fig. 2. Martensite point depending on the content of carbon and chromium in austenite [3].
Symbols are experimental results of different authors; lines are the results of calculation according to the equation

Таблица 1

Химический состав исследованных сплавов и температуры мартенситных точек

Table 1

Chemical composition and martensite point temperature of the alloys under study

N п/п	Содержание элементов, %						Температура Мн, °С	Условная марка стали
	C	S	P	Si	Mn	Ni		
1	0,14	0,007	0,016	0,25	0,40	4,0	370	14Н4
2	0,34	0,010	0,016	0,31	0,35	4,0	300	34Н4
3	0,60	0,014	0,008	0,36	0,11	4,09	190	60Н4
4	0,81	0,019	0,012	0,31	0,13	3,90	160	81Н4
5	1,07	0,008	0,020	0,34	0,26	3,85	140	107Н4
6	1,15	0,013	0,010	0,37	0,26	4,06	140	115Н4
7	1,43	0,010	0,016	0,40	0,12	4,05	160	143Н4

Существует ряд методов определения мартенситной точки, в том числе магнитный, дилатометрический, терморентгенографический и термический анализ [19–21]. Сохраняет свои позиции и структурный (металлографический) метод непосредственного наблюдения за поверхностью образца, охлаждаемого в вакууме [22, 23]. В отечественной практике продолжают активно использоваться модернизированные установки типа ИМАШ М.Г. Лозинского [24].

В настоящей работе исследование проводилось на высокотемпературной вакуумной установке типа ИМАШ-5М при остаточном давлении в камере $4*10^{-3}$ Па. Испытывались плоские образцы размером 1,5 × 8 × 50 мм. Нагрев осуществлялся пропусканием через образец тока промышленной частоты. Температура измерялась платинородий-платиновой термопарой, приваренной точечной сваркой к боковой поверхности середины образца. Температура аустенитизации образцов для всех сплавов составляла 950°С, при которой осуществлялась 10-минутная выдержка. Затем температура снижалась до 850°С, давалась выдержка продолжительностью 5 минут, по истечении которой фотографировалась микроструктура.

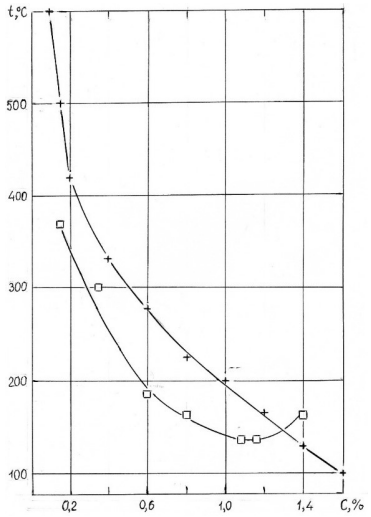

Рис. 3. Температура мартенситной точки в зависимости от содержания углерода. Верхняя кривая – углеродистые стали по литературным данным. Нижняя кривая – легированные никелем стали (результаты экспериментов)

Fig. 3. Martensite point depending on carbon content. The upper curve is carbon steels according to literature data. The lower curve is nickel-alloyed steels (experimental results)

a) b)

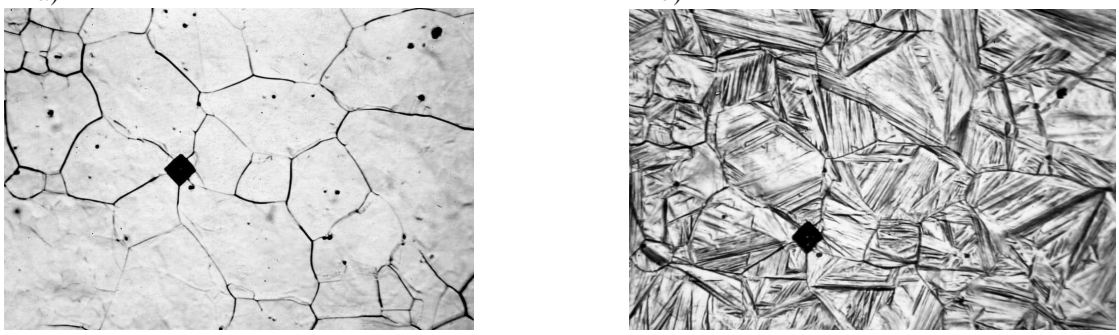

Рис. 4. Начало образования мартенсита (первые иглы) – (а) и конечная структура стали 60Н4 – (б)

Fig. 4. The start of martensite transformation (first needles) – (a) and the final structure of 60N4 steel – (b)

Охлаждение образцов производилось от температуры 850°С при выключенном токе путем теплоотвода через медные охлаждаемые электроды. Начало мартенситного превращения определялось при помощи микроскопа МВТ при увеличении 160^{x} по появлению первых игл мартенсита.

Результаты исследования

Результаты экспериментов представлены в виде графика зависимости температуры мартенситной точки от содержания углерода (рис. 1) в углеродистых сталях (верхняя кривая) и в сталях, легированных 4% никеля (нижняя кривая). Верхняя построена по обобщенным данным различных исследователей; нижняя – по результатам настоящего исследования (табл. 1).

При рассмотрении хода нижней кривой видно, что наибольшее влияние на мартенситную точку никель оказывает в низкоуглеродистых сталях. С повышением содержания углерода влияние никеля ослабевает, а для стали 1,43% углерода мартенситная точка находится даже выше, чем в углеродистой стали с аналогичным содержанием углерода.

Начало мартенситного превращения и конечная структура стали с содержанием углерода 0,60% представлены на рис. 4.

a) b)

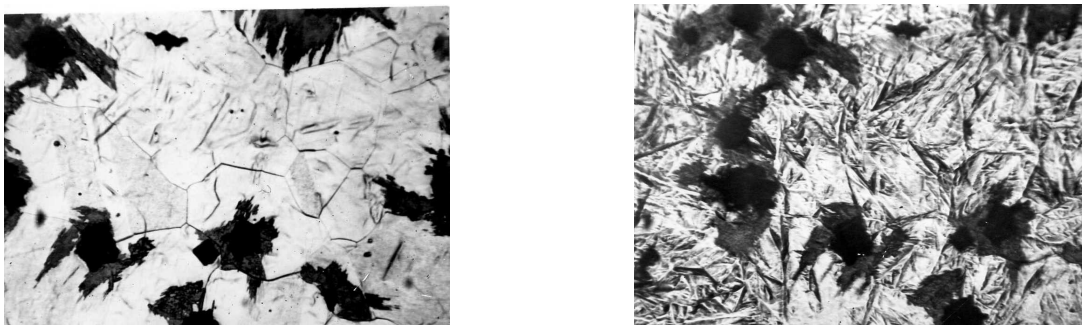

Рис. 5. Начало образования мартенсита (первые иглы) – (а) и конечная структура стали 143Н4 – (б)
Fig. 5. The start of martensite transformation (first needles) – (a) and final structure of 143N4 steel – (b)

Для стали с 1,43% углерода (рис. 5) выявлено, что даже при быстром охлаждении происходит графитизация.

Графитизация приводит к обеднению аустенита углеродом и, как следствие, к повышению мартенситной точки.

Заключение

Анализ влияния никеля на кривую зависимости температуры мартенситной точки от содержания в стали углерода показал, что при различном содержании углерода влияние никеля различно. Оно наиболее значительно при низком содержании углерода и ослабевает с его повышением. Последнее объясняется графитизацией, происходящей перед мартенситным превращением. Таким образом, при определении мартенситной точки нельзя пренебрегать фазовыми превращениями с участием углерода даже в сталях, легированных некарбидообразующими элементами. Для разных диапазонов содержания углерода зависимость различается.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А., Калетин А.Ю.** О роли остаточного аустенита в структуре легированных сталей и влиянии на него внешних воздействий // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115, № 9. С. 962–976. DOI: 10.7868/S0015323014090101

[2] **Kobasko N., Aronov M., Powell J., Vanas J.** Intensive Quenching of Steel Parts: Equipment and Method // Proceedings of the 7th IASME / WSEAS International Conference on Heat Transfer. Thermal Engineering and Environment (HTE '09). WSEAS Press, 2009. P. 153–158. DOI: 10.13140/RG.2.2.17040.56328

[3] **Созыкина А.С., Савушкина Е.С., Окишев К.Ю.** Мартенситная точка высокохромистого аустенита // Уральская школа молодых металловедов. Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур», 2023. С. 295–298.

[4] **Васильев А.А., Голубков Н.А., Соколов Д.Ф., Соколов С.Ф.** Исследование и моделирование кинетики мартенситного превращения в высокопрочных конструкционных сталях // Уральская школа молодых металловедов. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. С. 274–277.

[5] **Ingber J., Kunert M.** Prediction of the Martensite Start Temperature in High-Carbon Steels // Steel Research International. 2022. Vol. 93. Iss. 5. Art. no. 2100576. DOI: 10.1002/srin.202100576

[6] **Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Сурнаева О.А.** Исследование кинетики мартенситного превращения в легированных сталях // Уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. Ч. 1. С. 107–111.

[7] Overview of equations for estimating Ms. Режим доступа: https://www.eah-jena.de/fileadmin/user_upload/eah-jena.de/fachbereich/scitec/SciTec-Personen/Kunert_Maik/Predicting_the_Ms_-_Overview_of_Equations.pdf (дата обращения: 25.07.2024).

[8] **Кащенко М.П., Чащина В.Г.** Зависимость температуры начала γ → α мартенситного превращения от размера зерна // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13, № 1. С. 37–45.

[9] **Мирзаев Д.А., Созыкин С.А., Маковецкий А.Н., Красноталов А.О., Юсупова Л.И.** Дилатометрическое исследование образования мартенсита и эффектов стабилизации аустенита в высокохромистой трубной стали // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120, № 8. С. 840–844. DOI: 10.1134/S0015323019060081

[10] **Khalaj O., Saebnoori E., Mašek B., Štadler C., Hassas P., Svoboda J.** The Influence of Cooling Rate between Ms and Mf on the Mechanical Properties of Low Alloy 42SiCr Steel Treated by the Q-P Process // Metals. 2022. Vol. 12. Iss. 12. Art. no. 2081. DOI: 10.3390/met12122081

[11] **Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Морозова Ю.Н.** Изменение температуры критических точек сталей при воздействии внешним магнитным полем во время мартенситного превращения // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 1, № 11 (28). С. 570–573.

[12] **Золотаревский И.В., Щетинина М.О., Золотаревский А.И.** Мартенситное превращение в сильных магнитных полях в сплавах Fe–Ni, легированных хромом, марганцем и углеродом // Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 122, № 2. С. 138–144. DOI: 10.31857/S001532302102011X

[13] **Цветкова Г.В., Скотникова М.А., Белов Ю.М., Крылов Н.А., Иванов Е.К.** Структурное и фазовое состояние наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2010. Т. 4, № 110. С. 129–137.

[14] **Пышминцев И.Ю., Битюков С.М., Гусев А.А.** Влияние остаточного аустенита на механические свойства стали с 15 % Cr // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2023. Т. 66, № 5. С. 571–579. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-5-571-579

[15] **Dong Y., Qi M., Du Y., Wu H., Gao X., Du L.** Significance of Retained Austenite Stability on Yield Point Elongation Phenomenon in a Hot-Rolled and Intercritically Annealed Medium-Mn Steel // Steel Research International. 2022. Vol. 93. Iss. 11. Art. no. 2200400. DOI: 10.1002/srin.202200400

[16] **Yang J.R., Yu T.H., Wang C.H.** Martensitic transformations in AISI 440C stainless steel // Materials Science and Engineering: A. 2006. Vol. 438–440. P. 276–280. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.098

[17] **Никифорова С.М., Хадыев М.С., Жилин А.С., Филиппов М.А, Рыжков М.А., Озерец Н.Н.** Новые режимы обработки высокохромистых сталей с высокой износостойкостью для насосов буровых установок // Фундаментальные исследования. 2016. № 10. С. 73–77.

[18] **Teplukhin V.G., Popov A.I., Kudryavtsev V.N., Fomin D.S., Radkevich M.M.** Features of Investigation of Steels with a Metastable Austenitic Structure // Advances in Mechanical Engineering (MMESE 2022) Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2023. P. 164–171. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_18

[19] **Казанцева Н.В., Степанова Н.Н., Виноградова Н.И., Демаков С.Л, Юровских А.С., Давыдов Д.И., Шишкин Д.А., Ригмант М.Б., Романов Е.П.** Исследование мартенситного превращения в сплаве Co-9 ат. % Al // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117, № 1. С. 46. DOI: 10.7868/S0015323016010071

[20] **Калетина Ю.В., Герасимов Е.Г., Терентьев П.Б., Калетин А.Ю.** Мартенситное превращение, магнитотранспортные свойства и магнитокалорический эффект в сплавах Ni47-xMn42+xIn11 (0≤x≤2) // Физика твердого тела. 2021. Т. 63, № 4. С. 521–526. DOI: 10.21883/FTT.2021.04.50719.184

[21] **Теплухина И.В., Батасов А.В., Ованесьян К.К., Вологжанина С.А., Гречихина И.А., Анисимова В.В.** 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: 10.18721/JEST.29110

[22] **García de Andrés C., Bartolomé M.J., Capdevila C., San Martín D., Caballero F.G., López V.** Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels // Materials Characterization. 2001. Vol. 46. Iss. 5. P. 389–398. DOI: 10.1016/S1044-5803(01)00142-5

[23] **Collins J., Taylor M., Scarlett A.L., Palmiere E.J., Pickering E.J.** Prior austenite grain measurement: A direct comparison of EBSD reconstruction, thermal etching and chemical etching // Materials Characterization. 2024. Vol. 208. Art. no. 113656. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.113656

[24] **Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Нефедов Д.В.** Методика исследования фазовых превращений под действием постоянного магнитного поля на установке для высокотемпературной металлографии // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов (СМП-03). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 125–129.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТЕПЛУХИН Гелий Николаевич – *умер 21.07.2021, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: cornfield@yandex.ru

ТЕПЛУХИН Василий Гельевич – *доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: cornfield@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0535-7899

КУЗНЕЦОВ Руслан Валерьевич – *старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: spaun1605@rambler.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5670-8784

РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович – *профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: radmich@mail.ru

REFERENCES

[1] **V.M. Schastlivtsev, Y.V. Kaletina, E.A. Fokina, A.Y. Kaletin,** On the role of retained austenite in the structure of alloyed steels and the effect of external factors, Physics of Metals and Metallography, 115 (9) (2014) 904–917. DOI: 10.1134/S0031918X14090105

[2] **N. Kobasko, M. Aronov, J. Powell, J. Vanas,** Intensive Quenching of Steel Parts: Equipment and Method, Proceedings of the 7th IASME / WSEAS International Conference on Heat Transfer. Thermal Engineering and Environment (HTE '09), WSEAS Press, (2009) 153–158. DOI: 10.13140/RG.2.2.17040.56328

[3] **A.S. Sozykina, E.S. Savushkina, K.Yu. Okishev,** Martensitic Point of High Chromium Austenite, Ural School for Young Metal Scientists, Publishing House “Azhur”, Ekaterinburg, (2023) 295–298.

[4] **A.A. Vasilev, N.A. Golubkov, D.F. Sokolov, S.F. Sokolov,** Investigation and Modeling Kinetics of Martensitic Transformation in High-Strength Structural Steels, Ural School for Young Metal Scientists, Ural University Press, Ekaterinburg, (2020) 274–277.

[5] **J. Ingber, M. Kunert,** Prediction of the Martensite Start Temperature in High-Carbon Steels, Steel Research International, 93 (5) (2022) 2100576. DOI: 10.1002/srin.202100576

[6] **M.V. Maysuradze, M.A. Ryzhkov, O.A. Surnaeva,** Investigation of Martensite Transformation Kinetics in Alloyed Steels, Ural School for Young Metal Scientists, Ural University Press, Ekaterinburg, 1 (2016) 107–111.

[7] Overview of equations for estimating Ms, https://www.eah-jena.de/fileadmin/user_upload/eah-jena.de/fachbereich/scitec/SciTec-Personen/Kunert_Maik/Predicting_the_Ms_-_Overview_of_Equations.pdf. Accessed July 25, 2024)

[8] **M.P. Kashchenko, V.G. Chashchina,** Grain Size Dependence of the γ → α Martensite Transformation Starting Temperature, Physical Mesomechanics, 13 (1) (2010) 37–45.

[9] **D.A. Mirzaev, S.A. Sozykin, A.O. Krasnotalov, A.N. Makovetskii, L.I. Yusupova,** Dilatometric Study of the Formation of Martensite and of the Effects of Stabilization of Austenite in High-Chromium Pipe Steel, Physics of Metals and Metallography, 120 (8) (2019) 770–774. DOI: 10.1134/S0031918X19060085

[10] **O. Khalaj, E. Saebnoori, B. Mašek, C. Štadler, P. Hassas, J. Svoboda,** The Influence of Cooling Rate between Ms and Mf on the Mechanical Properties of Low Alloy 42SiCr Steel Treated by the Q-P Process, Metals, 12 (12) (2022) 2081. DOI: 10.3390/met12122081

[11] **V.N. Pustovoit, Y.V. Dolgachev, Y.N. Morozova,** Temperature change of critical points of steel when exposed to an external magnetic field during martensitic transformation, Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki [Actual Science Research and Development], 1 (11 (28)) (2018) 570–573.

[12] **I.V. Zolotarevsky, M.O. Schetinina, O.I. Zolotarevsky,** Martensitic Transformation in Fe–Ni Alloys with Addition of Chromium, Manganese, and Carbon in High Magnetic Fields, Physics of Metals and Metallography, 122 (2) (2021) 127–133. DOI: 10.1134/S0031918X21020113

[13] **G.V. Tsvetkova, M.A. Skotnikova, Y.M. Belov, N.A. Krylov, E.K. Ivanov,** Structural and phase condition facing materials intended for workers blades amalgamators, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology, 4 (110) (2010) 129–137.

[14] **I.Yu. Pyshmintsev, S.M. Bityukov, A.A. Gusev,** Effect of Retained Austenite on Mechanical Properties of Steel with 15 % Cr, Izvestiya. Ferrous Metallurgy, 66 (5) (2023) 571–579. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-5-571-579

[15] **Y. Dong, M. Qi, Y. Du, H. Wu, X. Gao, L. Du,** Significance of Retained Austenite Stability on Yield Point Elongation Phenomenon in a Hot-Rolled and Intercritically Annealed Medium-Mn Steel, Steel Research International, 93 (11) (2022) 2200400. DOI: 10.1002/srin.202200400

[16] **J.R. Yang, T.H. Yu, C.H. Wang,** Martensitic transformations in AISI 440C stainless steel, Materials Science and Engineering: A, 438–440 (2006) 276–280. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.098

[17] **S.M. Nikiforova, M.S. Khadyev, A.S. Zhilin, M.A. Filippov, M.A. Ryzhkov, N.N. Ozerets,** New modes of heat treatment of high-chromium steels with high wear resistance for pumps, Fundamental research, 10 (2016) 73–77.

[18] **V.G. Teplukhin, A.I. Popov, V.N. Kudryavtsev, D.S. Fomin, M.M. Radkevich,** Features of Investigation of Steels with a Metastable Austenitic Structure, Advances in Mechanical Engineering (MMESE 2022) Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham, (2023) 164–171. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_18

[19] **N.V. Kazantseva, N.N. Stepanova, N.I. Vinogradova, S.L. Demakov, A.S. Yurovskikh, D.I. Davydov, D.A. Shishkin, M.B. Rigmant, E.P. Romanov**, Study of the martensitic transformation in the Co–9 at % Al alloy, Physics of Metals and Metallography, 117 (1) (2016) 42–48. DOI: 10.1134/S0031918X16010075

[20] **Y.V. Kaletina, E.G. Gerasimov, P.B. Terent'ev et al.,** Martensitic Transformation, Magnetotransport Properties, and Magnetocaloric Effect in Ni47-xMn42+xIn11 Alloys (0≤x≤2), Physics of the Solid State, 63 (4) (2021) 550–555. DOI: 10.1134/S1063783421040090

[21] **I.V. Teplukhina, A.V. Batasov, K.K. Ovanesyan et al.,** Features of austenite decay and patterns of structure formation in low-alloy steel grade 09G2SA-A under continuous cooling, Global Energy, 29 (1) (2023) 170–180. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.29110

[22] **C. García de Andrés, M.J. Bartolomé, C. Capdevila, D. San Martín, F.G. Caballero, V. López,** Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels, Materials Characterization, 46 (5) (2001) 389–398. DOI: 10.1016/S1044-5803(01)00142-5

[23] **J. Collins, M. Taylor, A.L. Scarlett, E.J. Palmiere, E.J. Pickering,** Prior austenite grain measurement: A direct comparison of EBSD reconstruction, thermal etching and chemical etching, Materials Characterization, 208 (2024) 113656. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.113656

[24] **V.N. Pustovoit, Yu.V. Dolgachev, D.V. Nefedov,** Method of Investigation of Phase Transformations under the Action of a Constant Magnetic Field on a High-Temperature Metallography Unit, Modern problems

and directions of development of metal science and heat treatment of metals and alloys, Southwestern State University, Kursk, (2022) 125–129.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Gelii N. TEPLUKHIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: cornfield@yandex.ru

Vasilii G. TEPLUKHIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: cornfield@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0535-7899

Ruslan V. KUZNETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: spaun1605@rambler.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5670-8784

Mikhail M. RADKEVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: radmich@mail.ruц

Поступила: 19.08.2024; Одобрена: 12.09.2024; Принята: 17.09.2024.
Submitted: 19.08.2024; Approved: 12.09.2024; Accepted: 17.09.2024.