



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-2-140-150

УДК 66.065.32-977

EDN: GSPCLR

Научная статья / Research article

Исследование влияния термоциклирования на магнитные и механические свойства сталей

А.В. Корнилова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Москва, Россия

✉ Anna44@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 7 февраля 2024 г.

Доработана: 4 апреля 2024 г.

Принята к публикации: 10 апреля 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. В настоящее время во всем мире процессы термоциклической обработки признаны наиболее эффективными способами повышения стойкости металлообрабатывающих инструментов. Однако для конструкционных сталей эта перспективная технология мало изучена. А вопрос влияния термоциклической обработки на магнитные свойства (коэрцитивную силу) в научной литературе практически не поднимался. Поэтому авторами была поставлена цель исследовать изменение коэрцитивной силы и твердости сталей при применении различных схем термоциклической обработки. При проведении экспериментов были исследованы стали различного назначения (конструкционные и инструментальные) и химического состава. Исследованы маятниковое, низкотемпературное, среднетемпературное, высокотемпературное термоциклирование и термоциклирование вблизи точки Кюри цементита. Все стандартные виды термоциклирования показали падение коэрцитивной силы. Для углеродистой конструкционной стали было проведено термоциклирование вблизи точки Кюри цементита. На третьем цикле сталь показала скачок свойств. В результате исследования структуры выявлено, что произошла частичная сфероидизация перлита, несмотря на то что термоциклирование проходило ниже линии фазовых превращений, а также показано, что зернистый перлит обладает существенно большей коэрцитивной силой, чем перлит пластинчатый. Вопрос нуждается в дальнейшем исследовании, а явление должно найти свое практическое применение.

Ключевые слова: термоциклирование, твердость, коэрцитивная сила, пластинчатый перлит, зернистый перлит

Для цитирования

Корнилова А.В. Исследование влияния термоциклирования на магнитные и механические свойства сталей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 2. С. 140–150. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-140-150>

© Корнилова А.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Investigation of the Effect of Thermal Cycling on the Magnetic and Mechanical Properties of Steels

Anna V. Kornilova^{ORCID}

National Research Moscow State University of Civil Engineering, *Moscow, Russia*

✉ Anna44@yandex.ru

Article history

Received: February 7, 2024

Revised: April 4, 2024

Accepted: April 10, 2024

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. Currently, throughout the world, thermal cycling processes are recognized as the most effective ways to increase the durability of metalworking tools. However, this promising technology has been little studied for structural steels. But the question of the influence of thermal cycling on magnetic properties (coercive force) has practically not been raised in the scientific literature. Therefore, in this work, the goal was to study the change in the coercive force and hardness of steels when using various thermal cycling schemes. During the experiments, steels of various purposes (structural and instrumental) and chemical composition were investigated. The following were studied: — pendulum, low-temperature, medium-temperature, high-temperature thermal cycling and thermal cycling near the Curie temperature of cementite. All standard types of thermal cycling showed a drop in coercive force. Thermal cycling for carbon structural steel was carried out near the Curie point of cementite. The steel showed a jump in properties during the third cycle. A study of the structure revealed that partial spheroidization of pearlite occurred despite the fact that thermal cycling took place below the line of phase transformations. Research has shown that granular pearlite has a significantly greater coercive force than lamellar pearlite. The issue needs further research, and the phenomenon must find its practical application.

Keywords: thermal cycling, hardness, coercive force, lamellar pearlite, granular pearlite

For citation

Kornilova AV. Investigation of the effect of thermal cycling on the magnetic and mechanical properties of steels. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):140–150. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-140-150>

Введение

Термоциклирование — множество циклов изменения температуры между заданными экстремальными значениями. В качестве неразрушающего контроля термоциклирование применяется для выявления скрытых дефектов изделий, которые могут проявиться в процессе эксплуатации. Другое применение термоциклирования — термоциклическая обработка металлических изделий (ТЦО). Метод ТЦО как способ термообработки (ТО) основан на постоянном накоплении от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов. При этом важной особенностью цикла является его интенсивность, отсутствие или

наличие небольших выдержек при крайних температурах, а также оптимальный диапазон изменения температуры. ТЦО позволяет существенно повысить конструкционную прочность и снизить металлоемкость изделий и конструкций. ТЦО металлов и сплавов, являясь одной из разновидностей термопластической обработки, имеет два основных технологических направления в повышении долговечности и надежности деталей машин. Первое из них связано с повышением прочности и вязкости разрушения сталей и сплавов многих конструкционных металлических материалов за счет создания в них оптимальной фрагментарной структуры (измельчение зерна, субструктур-

ное упрочнение) и снятия напряжений. Другое — с упрочнением поверхностных слоев изделий за счет интенсификации диффузионных процессов. В обоих случаях эффекту термоциклического упрочнения существенно способствуют гетерофазное состояние и использование объемного эффекта фазовых превращений в металлах и сплавах [1].

В последние годы интерес к ТЦО в мире возрос. Анализ публикаций в периодической научной печати и патентов по теме исследования показал, что основные страны-патентообладатели по этой теме Япония и Китай (на них приходится 45 % патентов), а наибольшее количество запатентованных решений по ТЦО приходится на 2021 и 2022 гг. В [2] экспериментально доказано, что ТЦО позволяет достигать оптимального сочетания прочности и пластичности в сталях, содержащих никель и марганец за счет измельчения зерна. Эффект термоциклирования применительно к изделиям из композитов рассмотрен в [3].

В результате анализа литературных данных установлено, что многократные полиморфные превращения в стали при ТЦО приводят к фазовому наклепу, измельчению микро- и субзеренной структуры, увеличению плотности дислокаций и дефектов кристаллического строения. Такая структура создает преимущественно деформационное (дислокационное) упрочнение во всем объеме стальной матрицы.

Процессы ТЦО являются наиболее эффективными и экономичными способами повышения стойкости режущих и штамповых металлообрабатывающих инструментов. Однако для изменения свойств конструкционных углеродистых сталей эта перспективная технология мало изучена. А вопрос влияния ТЦО на магнитные свойства сталей практически в научной литературе не поднимался. Поэтому в данной работе была поставлена *цель — исследовать изменение коэрцитивной силы и твердости сталей при применении различных схем ТЦО.*

1. Виды термоциклической обработки

По назначению все процессы ТЦО делятся на две основные группы:

1) предварительная ТЦО для улучшения структуры перед термической и механической обработкой;

2) упрочняющая ТЦО (УТЦО), формирующая структуру закаленной стали с окончательными рабочими свойствами.

В современных работах российских и белорусских ученых [4–6] и др. предложена новая классификация известных способов УТЦО. УТЦО может проходить с фазовыми превращениями или без них, с завершенными или незавершенными структурно-фазовыми превращениями при циклическом нагреве и охлаждении, осуществляться по диффузионному, сдвиговому или смешанному механизмам фазовой перекристаллизации, самостоятельно или вместе с другими видами воздействий. По уровню прикладываемых температур можно сгруппировать виды ТЦО сталей в три группы: 1) низкотемпературная (НТЦО), 2) среднетемпературная (СТЦО) и 3) высокотемпературная (ВТЦО). Режимы ТЦО различают по назначению, по характеру структурных превращений, по температурному диапазону термоциклирования [4]. СТЦО предусматривает нагрев в цикле до температуры выше A_{c1} ¹ (но ниже A_{c3} ²), при этом нижняя температура цикла может быть ниже A_{r1} ³ (при применении маятниковой ТЦО (МТЦО), или быть комнатной (лабораторной) 20 °С.

На рис. 1 показаны основные схемы ТЦО. Маятниковую ТЦО используют для измельчения зерна феррито-перлитных сталей. СТЦО применяется для получения сорбитообразной структуры в среднеуглеродистых улучшаемых сталях, для получения структуры зернистого перлита, уменьшения твердости. ВТЦО часто проводят с закалкой в последнем цикле, обеспечивающей повышенный комплекс механических характеристик. НТЦО часто применяется для устранения ликвации кремния.

¹ A_{c1} — температура начала превращения перлита в аустенит при нагреве (начало перекристаллизации).

² A_{c3} — температура перехода стали в однофазное аустенитное состояние (конец перекристаллизации).

³ A_{r1} — температура эвтектоидного превращения.

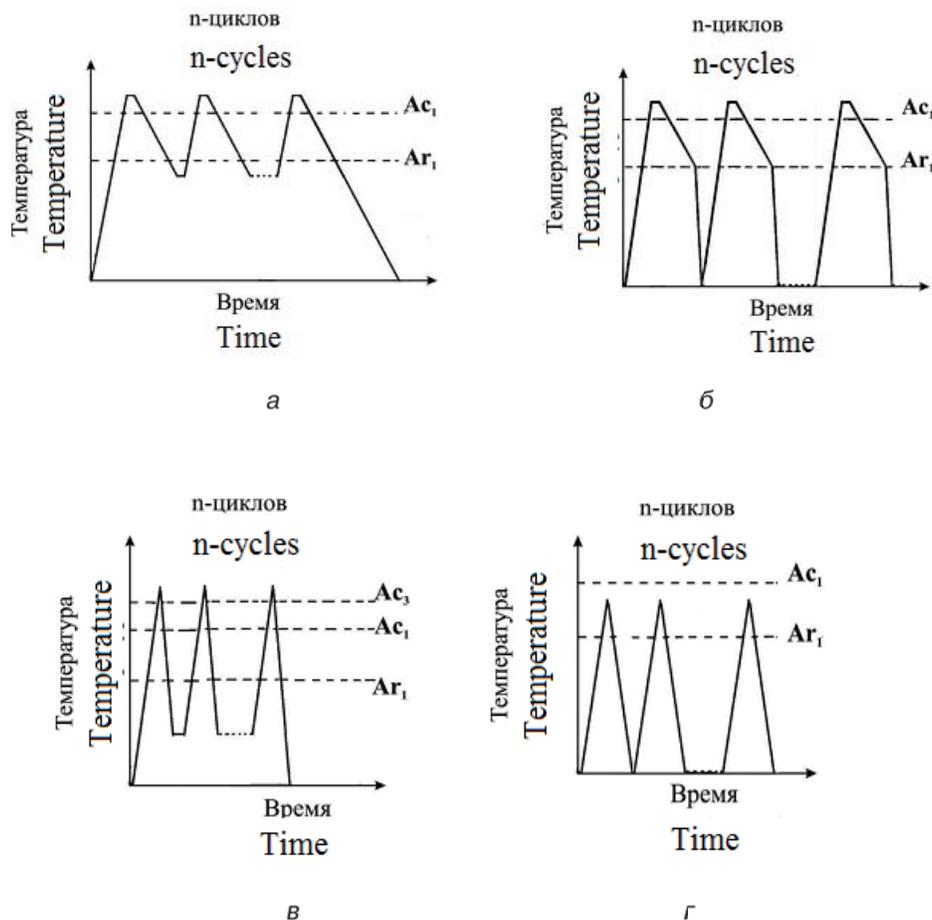


Рис. 1. Схемы ТЦО: а — маятниковая, б — среднетемпературная, в — высокотемпературная, г — низкотемпературная
Источник: [4]

Figure 1. Schemes of thermal cycling treatment (TCT):
a — pendulum, б — medium temperature, в — high temperature, г — low temperature
Source: [4]

2. Материалы и методы

Исследовались инструментальные и конструкционные стали — У8А, 40Х, Х12М и сталь 25. Критические точки исследуемых сталей приведены в табл. 1.

Для проведения экспериментов использовали следующее оборудование и приборы:

1. Лабораторная печь ПМ-16М-1200-В с микропроцессорными регуляторами температуры «РТ-1200» и «РТ-1250 Т».

2. Стационарный твердомер по измерению твердости по Роквеллу HR-150А.

3. Коэрцитиметр (структуроскоп) КИМ-2М.

4. Металлографический микроскоп Bresser Science MTL-201.

5. Пирометр для измерения температур при охлаждении.

Исследовались твердость и коэрцитивная сила. Из-за условия проведения эксперимента коэрцитивная сила измерялась перед первым циклом и после последнего 5-го цикла.

Размеры образцов 58×35×8 мм, что соответствует размерам ГСО 2192–89, комплект СОКС-1 для измерения магнитных характеристик сталей (рис. 2).

Таблица 1

Критические точки исследуемых сталей при нагревании

Сталь	Критические точки	
	Ac ₁ , °C	Ar ₁ , °C
У8А (ГОСТ 1435–99) ¹	720	700
40Х (ГОСТ 4543–2016) ²	743	693
Х12МФ (ГОСТ 5950–2000) ³	830	750
Сталь 25 (ГОСТ 1577–93) ⁴	735	680

Table 1

Critical points of the studied steels during heating

Steel	Critical points Steel's	
	Ac ₁ , °C	Ar ₁ , °C
U8A (GOST 1435–99) ¹	720	700
40X (GOST 4543–2016) ²	743	693
X12MV (GOST 5950–2000) ³	830	750
Steel 25 (GOST 1577–93) ⁴	735	680



Рис. 2. Часть исследуемых образцов
Источни к : выполнено А.В. Корниловой

Figure 2. Part of the studied specimens
Source : made by A.V. Kornilova

3. Результаты и обсуждение

Сталь 25 (качественная углеродистая конструкционная сталь). Термоциклирование было проведено по 4 различным схемам, рекомендованным в [4; 5]. Результаты эксперимента показаны в табл. 2.

В исследовании применялись низкотемпературное ТЦО — нагрев до 780 °С и охлаждение до 20 °С; среднетемпературное ТЦО — нагрев до 780 °С, охлаждение до 680 °С, затем охлаждение до 20 °С на спокойном воздухе; высокотемпературное ТЦО — нагрев до 880 °С, охлаждение до 650 °С и повторение цикла.

¹ ГОСТ 1435–99. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия.

² ГОСТ 4543–2016.Metalлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия.

³ ГОСТ 5950–2000. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали.

⁴ ГОСТ 1577–93. Прокат толстолистовой и широкополосный из конструкционной качественной стали. Технические условия.

Каждому виду ТЦО соответствовал контрольный образец, который был нагрет до максимальной температуры цикла и охлажден на спокойном воздухе. Изменение твердости и коэрцитивной силы по сравнению с первоначаль-

ным состоянием у контрольных образцов произошло в меньшей степени, чем у образцов, подвергнутых ТЦО, что, видимо, объясняется более полным прохождением фазовых процессов при ТЦО.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований стали 25

№ цикла	Низкотемпературное термоциклирование		Среднетемпературное термоциклирование		Высокотемпературное термоциклирование		Маятниковое термоциклирование	
	HRB	Hc, А/м	HRB	Hc, А/м	HRB	Hc, А/м	HRB	Hc, А/м
1	90	1023	90	1023	90	1023	90	1023
2	72		71		Из-за схемы проведения эксперимента замеры невозможны		Из-за схемы проведения эксперимента замеры невозможны	
3	71		70					
4	70		69					
5	69	783	67	715	67	603	66	603

Источник: выполнено А.В. Корниловой

Table 2

The Results of Experimental Studies Steel 25

Cycle's number	Low-temperature thermocycling		Medium-temperature thermocycling		High-temperature thermocycling		Pendulum thermocycling	
	HRB	Hc, A/m	HRB	Hc, A/m	HRB	Hc, A/m	HRB	Hc, A/m
1	90	1023	90	1023	90	1023	90	1023
2	72		71		Due to the scheme of the experiment, measurements are not possible		Due to the scheme of the experiment, measurements are not possible	
3	71		70					
4	70		69					
5	69	783	67	715	67	603	66	603

Source: made by A.V. Kornilova

Для проверки результатов работ [7; 8], которые были положены в основу патента [9], был проведен эксперимент по схеме: нагрев при температуре печи 300 °С со скоростью 1 мм/мин до полного прогрева сечения, выдержка 5 мин после полного прогрева, охлаждение на спокойном воздухе. Цикл повторяли 5 раз. На третьем цикле было зафиксировано резкое увеличение коэрцитивной силы и твердости образцов. Исследование микроструктуры после ТЦО показало, что произошла частичная сфероидизация перлита, несмотря на то что ТЦО проходило ниже линии PSK диаграммы «железо — цемен-

тит», на которой происходит первое фазовое превращение при нагреве (рис. 3).

Аналогичное явление — повышение твердости и ударной вязкости при термоциклировании вблизи точки Кюри цементита (210 °С) было установлено и в работах белорусских ученых научной школы профессора А.А. Шматова, который выявил этот эффект экспериментально и аналитически, решая уравнение Фоккера — Планка и опираясь на данные работ [10–12] для нанокластерного образования зернистого цементита Fe₃C, эксперимент проводился на стали У8 (рис. 4).

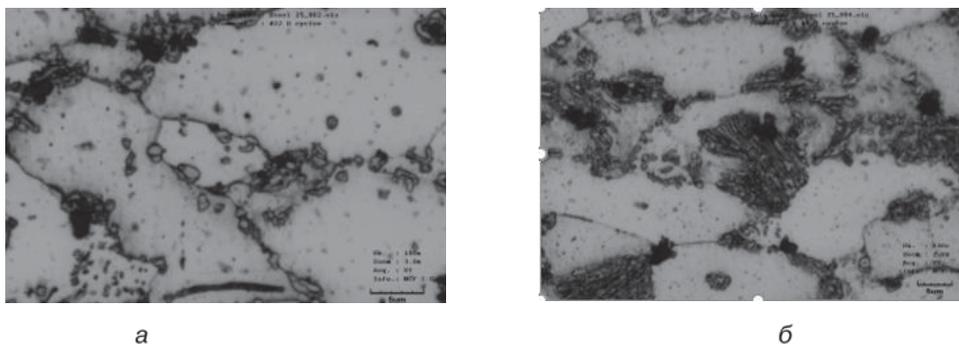


Рис. 3. Микроструктура образца (вырезка поперек проката):
 а — до ТЦО, б — после третьего цикла ТЦО
 И с т о ч н и к : выполнено А.В. Корниловой
Figure 3. Microstructure of the steel specimen (cutting across the rolled product):
 а — before the TCO, б — after the third cycle of the TCT
 S o u r c e : made by A.V. Kornilova

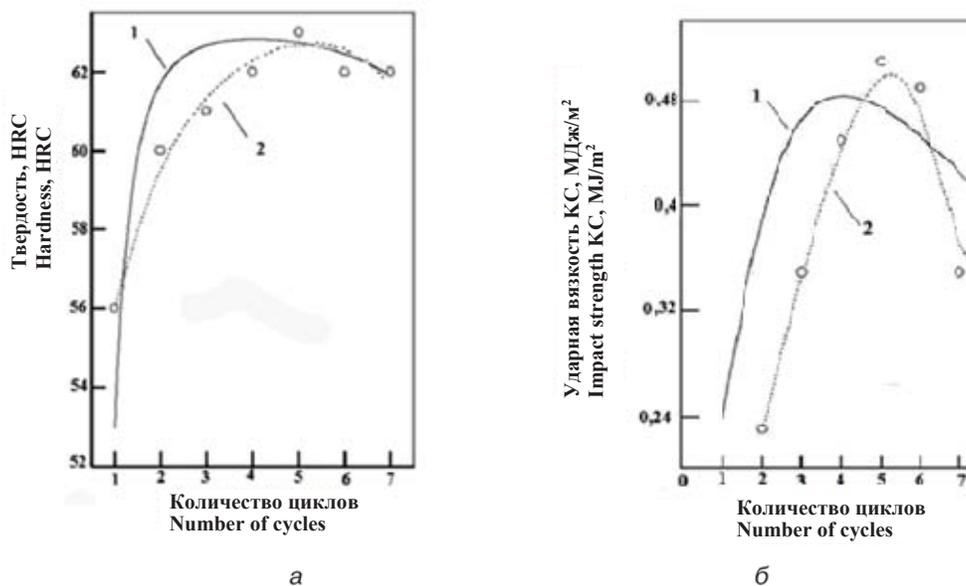


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная зависимости твердости (а) и ударной вязкости (б) стали У8 после ТЦО:
 1 — расчетные данные, 2 — экспериментальные данные
 И с т о ч н и к : [6]
Figure 4. Calculated and experimental dependences of the hardness (а) and impact strength (б) of steel U8 after thermal cycling:
 1 — calculated data, 2 — experimental data
 S o u r c e : [6]

В [13–15] экспериментальным путем установлено, что зернистый перлит обладает более высокими значениями коэрцитивной силы, чем пластинчатый. Пока можно только зафиксировать этот факт и предположить, что граница зерен зернистого перлита имеет большую протяженность, что влияет на процесс намагничи-

вания. Обобщенные результаты исследования ТЦО исследуемой стали показаны на рис. 5 — зависимость твердости и рис. 6 — коэрцитивной силы от числа циклов ТЦО (конечные значения коэрцитивной силы для высокотемпературного и маятникового ТЦО для исследуемой стали совпали).

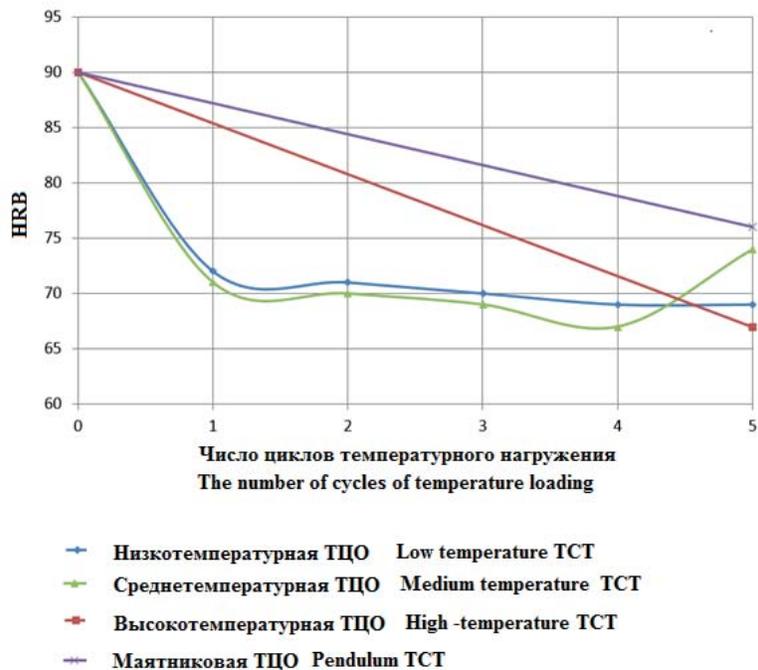


Рис. 5. Зависимость твердости от числа циклов ТЦО
 И с т о ч н и к : выполнено А.В. Корниловой
Figure 5. The dependence of hardness on the number of cycles
 S o u r c e : made by A.V. Kornilova

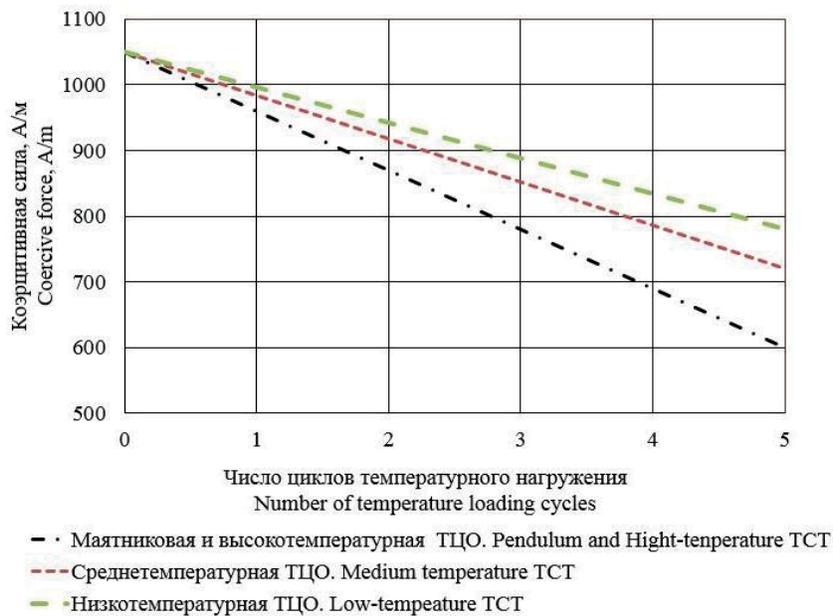


Рис. 6. Зависимость коэрцитивной силы от числа циклов ТЦО
 И с т о ч н и к : выполнено А.В. Корниловой
Figure 6. The dependence of coercive force on the number of cycles
 S o u r c e : made by A.V. Kornilova

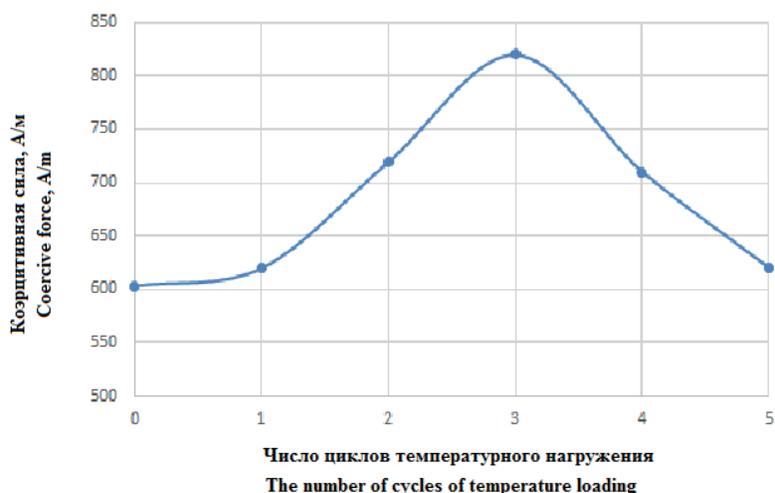


Рис. 7. Зависимость коэрцитивной силы от числа циклов ТЦО
 И с т о ч н и к : выполнено А.В. Корниловой
Figure 7. Dependence of coercive force on the number of cycles TCT
 S o u r c e : made by A.V. Kornilova

Также был проведен эксперимент по закалке в воду стали 25, который показал, что закалка исследуемых образцов повысила исследуемые свойства (в 2,5 раза), несмотря на недостаточное для этого количество углерода. Вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

Сталь У8А. Сталь имеет эвтектоидную структуру в равновесном состоянии. ТЦО проводилась по схеме нагрев до 750 °С и охлаждение на спокойном воздухе до температуры 20 °С (5 циклов). Графическое представление полученных результатов показано на рис. 7. На третьем цикле сталь показала скачок свойств.

Данные полностью соответствуют результатам работы [6], где данное явление объясняется следующим образом: при ТЦО конкурируют два взаимно противоположных процесса: растворение цементитных фаз, с одной стороны; укрупнение и зародышеобразование включений цементита, — с другой, в результате чего после проведения ТЦО эвтектоидной стали формируется композиционная структура, состоящая из двух видов зерен с большой и малой концентрациями углерода.

Стали с содержанием хрома. Для стали 40Х применен маятниковый тип ТЦО, для стали

X12МФ — высокотемпературное ТЦО. При этих схемах невозможны промежуточные замеры. У стали X12МФ коэрцитивная сила уменьшилась на пятом цикле с 580 до 470 А/м, у стали 40Х — с 200 до 130 А/м.

Заключение

ТЦО имеет ряд преимуществ перед стандартными термическими обработками, у которых ограниченное число параметров — температура, время выдержки, скорость нагрева, скорость охлаждения. Возможности совершенствования этих технологий практически исчерпаны. При ТЦО число параметров больше — добавляются число циклов, температуры цикла верхняя и нижняя. Можно варьировать и сами циклы. Важным технологическим моментом при проведении ТЦО являются высокие скорости нагрева.

Одним из неожиданных результатов исследования явилось то, что зернистый перлит обладает существенно большей коэрцитивной силой, чем перлит пластинчатый. Это явление также зафиксировано учеными Института физики металлов УрО РАН при исследовании

эвтектоидной стали с различными формами перлита. Данный вопрос нуждается в дальнейшем исследовании, а явление должно найти свое практическое применение.

1. При проведении экспериментов были исследованы стали различного назначения: инструментальные — углеродистая У8А, легированная Х12МФ, конструкционные — углеродистая сталь 25, легированная 40Х. Исследованы мартеновское, низкотемпературное, среднетемпературное, высокотемпературное ТЦО и ТЦО вблизи точки Кюри цементита (для стали 25).

2. Для стали 25 все стандартные виды ТЦО показали падение исследуемых свойств. Такой же результат показали стали 40Х и Х12МФ. Кроме того, для стали 25 было проведено ТЦО вблизи точки Кюри цементита. На третьем цикле сталь показала скачок свойств. Исследование структуры выявило, что произошла частичная сфероидизация перлита, несмотря на то что ТЦО проходило ниже линии PSK. Также был проведен эксперимент по закалке в воду стали 25, который показал, что закалка исследуемых образцов повысила исследуемые свойства (2,5 раза), несмотря на недостаточное для этого количество углерода. Вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

3. Для стали У8А был проведен эксперимент, который подтвердил выводы ученых белорусской школы, занимающихся исследованием применения ТЦО для инструментальных сталей, под руководством А.А. Шматова. На третьем цикле при нагреве выше A_{c1} на 30 °С охлаждение до температуры 20 °С произошло резкое увеличение исследуемых свойств.

Список литературы

1. *Аргунова А.А.* Структурные изменения и механические свойства низколегированных сталей и их сварных соединений после термоциклической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01: защищена 14.12.2000; утв. 20.06.2001. Якутск, 2000. 113 с.
2. *Jha S.R., Ardham S., Tennyson G., Gurao N.P., Biswas K.* An experimental and computational framework to investigate the thermal cycling approach for strengthening low SFE FeMnNi medium entropy alloy // *Materialia*. 2023. Vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101937>
3. *Luders C., Kalinka G., Li W., Sinapius M., Wille T.* Experimental and numerical multiscale approach to thermally cycled FRP // *Composite Structures*. 2020. Vol. 244. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112303>
4. *Шматов А.А.* Методы упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021. № 8. С. 59–63.
5. *Шматов А.А., Шоош Л., Крайни З.* Практическое применение технологии комбинированной упрочняющей обработки стальных инструментов // *Материаловедение*. 2023. № 9. С. 15–21. <http://doi.org/10.31044/1684-579X-2023-0-9-15-21>
6. *Шматов А.А.* Компьютерное моделирование упрочняющей термоциклической обработки эвтектоидной стали // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021. № 6. С. 82–86.
7. *Kornilova A.V., Kyaw Z.* The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in carbon hypoeutectoid steels // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2022. Т. 23. № 2. С. 140–145. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-140-145>
8. *Zaya K., Paing T., Kornilova A.V.* The effects of operational thermal cycling on mechanical and magnetic properties of structural steels // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 675. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012041>
9. *Корнилова А.В., Идармачев И.М., Тем Паинг М., Чжо Зяяр М.* Способ упрочнения мало- и среднеуглеродистых сталей. Патент № 2701239 С1 Российская Федерация, МПК C21D 1/78: заявл. 20.09.2018.2019.
10. *Chiou Wun C.Jr., Carter Emily A.* Structure and stability of Fe₃C-cementite surfaces from first principles // *Surface Science*. 2003. Vol. 530 (1–2). P. 88–100. [http://doi.org/10.1016/s0039-6028\(03\)00352-2](http://doi.org/10.1016/s0039-6028(03)00352-2)
11. *Валл А.Н., Растегин А.Э., Перевалова И.А.* Физическая кинетика. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 103 с.
12. *Босов А.Д., Орлов Ю.Н.* Эмпирическое уравнение Фоккера-Планка для нестационарных временных рядов // *Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН*. 2013. № 3. 30 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-3> (дата обращения: 12.01.2024)
13. *Stashkov A.N., Schapova E.A., Afanasiev S.V., Stashkova L.A., Nichipuruk A.P.* Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. Vol. 546. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168850>
14. *Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V.* Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // *NDT*

& E International. 2021. Vol. 118. <http://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102398>.

15. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Щапова Е.А., Казанцева Н.В., Макарова М.В. Структура и магнитные свойства стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления // Физика твердого тела. 2021. Т. 63. № 11. С. 1719–1724. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/51567>(дата обращения: 12.01.2024)

References

1. Argunova AA. Structural changes and mechanical properties of low-alloy steels and their welded joints after thermocyclic processing (dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 02/05/01: defended 12/14/2000: approved. 06/20/2001. Yakutsk; 2000. (In Russ.)

2. Jha SR, Ardham S, Tennyson G, Gurao NP, Biswas K. An experimental and computational framework to investigate the thermal cycling approach for strengthening low SFE FeMnNi medium entropy alloy. *Materialia*. 2023; 32:101937. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101937>

3. Luders C, Kalinka G, Li W, Sinapius M, Wille T. Experimental and numerical multiscale approach to thermally cycled FRP. *Composite Structures*. 2020;244:112303. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112303>

4. Shmatov AA. Methods of hardening processing of metalworking tools. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021;8:59–63. (In Russ.)

5. Shmatov AA, Shoosh L, Kraini Z. Practical application of the technology of combined hardening processing of steel tools. *Materials Science*. 2023;9:15–21. (In Russ.) <http://doi.org/10.31044/1684-579X-2023-09-15-21>

6. Shmatov AA. Computer modeling of strengthening thermal cyclic treatment of eutectoid steel. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021;6:82–86. (In Russ.)

7. Kornilova AV, Kyaw Z. The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in

carbon hypoeutectoid steels. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):140–145. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-140-145>

8. Zaya K, Paing T, Kornilova AV. The effects of operational thermal cycling on mechanical and magnetic properties of structural steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;675:1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012041>

9. Kornilova AV, Idarmachev IM, Thet Paing M, Zhuo Zayar M. Method of hardening low- and medium-carbon steels. Patent No. 2701239 C1 Russian Federation, IPC C21D 1/78.: application. 09.20.2018. 2019. (In Russ.)

10. Chiou Wun CJr, Carter Emily A. Structure and stability of Fe₃C-cementite surfaces from first principles. *Surface Science*. 2003;530(1–2):88–100. [http://doi.org/10.1016/s0039-6028\(03\)00352-2](http://doi.org/10.1016/s0039-6028(03)00352-2)

11. Wall AN, Rastegin AE, Perevalova IA. *Physical kinetics*. Irkutsk: ISU Publishing House; 2014.

12. Bosov AD, Orlov YuN. *Empirical Fokker-Planck equation for non-stationary time series*. Preprint of IPM im. M.V. Keldysh RAS. 2013;3. (In Russ.) Available from: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-3> (accessed: 12.01.2024)

13. Stashkov AN, Schapova EA, Afanasiev SV, Stashkova LA, Nichipuruk AP. Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022; 546:168850. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168850>

14. Stashkov AN, Schapova EA, Nichipuruk AP., Korolev AV. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel. *NDT & E International*. 2021;118:102398. <http://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102398>

15. Nichipuruk AP, Stashkov AN, Shchapova EA, Kazantseva NV, Makarova MV. Structure and magnetic properties of 09G2S steel produced by selective laser alloying. *Solid State Physics*. 2021;63(11):1719–1724. (In Russ.) Available from: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/51567> (accessed: 12.01.2024)

Сведения об авторе

Корнилова Анна Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры испытания сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240, ORCID: 0000-0001-5569-9320; E-mail: anna44@yandex.ru

About the author

Anna V. Kornilova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Testing of Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240; ORCID: 0000-0001-5569-9320; E-mail: anna44@yandex.ru