

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

№ 12 (810). ДЕКАБРЬ. 2022

ОСНОВАН В ИЮЛЕ 1955 г.
ВЫХОДИТ 12 РАЗ В ГОД

Главный редактор: В. С. Крапошин
Зам. гл. редактора: С. Ю. Кондратьев
Зав. редакцией: Н. В. Хабарова

Editor-in-Chief: V. S. Kraposhin
Deputy Editor-in-Chief: S. Yu. Kondrat'ev
Staff Editor: N. V. Khabarova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

С. К. Гордеев, В. И. Горынин, В. В. Захаров,
В. Н. Зикеев, Yin Fuxing, L. Kaczmarek,
С. Ю. Кондратьев, В. С. Крапошин, Л. И. Куksenova,
М. Л. Лобанов, К. В. Макаренко, V. Yu. Novikov,
А. А. Попов, М. Ю. Семенов, Ю. Н. Симонов,
Ю. А. Соколов, А. S. Chaus

EDITORIAL BOARD

S. K. Gordeev, V. I. Gorynin, V. V. Zakharov,
V. N. Zikeev, Yin Fuxing, L. Kaczmarek,
S. Yu. Kondrat'ev, V. S. Kraposhin, L. I. Kuksenova,
M. L. Lobanov, K. V. Makarenko, V. Yu. Novikov,
A. A. Popov, M. Yu. Semenov, Yu. N. Simonov,
Yu. A. Sokolov, A. S. Chaus

УЧРЕДИТЕЛИ: Издательский дом «Фолиум», редакция

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82955 от 14.03.2022 г.

Полная переводная версия журнала «Metal Science and Heat Treatment» (издательство Springer) включена в международные системы цитирования: Cambridge Scientific Abstracts, Chemical Abstracts Service (CAS), ChemWeb, Current Contents/Engineering, Computing and Technology, Inspec, Mathematical Science Citation Index, Science Citation Index, Science Citation Index Expanded (Sci-Search), SCOPUS. Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.

FOUNDERS: Folium Publishing Company, Editorial Office

SUBSCRIPTION INDEX
27847 («Pressa Rossii»)

ADDRESS

Bd. 6, 157, Dmitrovskoe sh., Moscow, 127411, Russia
Folium Publishing Company, MiTOM
Tel./Fax: +7 499 258 08 28; 8 916 062 37 72
E-mail: mitom@folium.ru <http://www.mitom.folium.ru>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС

27847 («Пресса России»)

АДРЕС РЕДАКЦИИ

Россия, 127411, Москва, Дмитровское ш., 157, стр. 6
Издательский дом «Фолиум», MiTOM
Тел./Факс: +7 499 258 08 28; 8 916 062 37 72
E-mail: mitom@folium.ru <http://www.mitom.folium.ru>

PUBLISHER ADDRESS

Bd. 6, 157, Dmitrovskoe sh., Moscow, 127411, Russia
Folium Publishing Company
Tel./Fax: (499) 258 08 28
E-mail: info@folium.ru
<http://www.folium.ru>

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ

Россия, 127411, Москва, Дмитровское ш., 157, стр. 6
Издательский дом «Фолиум»
Тел./Факс: +7 499 258 08 28
E-mail: info@folium.ru
<http://www.folium.ru>



МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

№ 12 (810). DECEMBER. 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИЧЕСКАЯ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Афанасьев В. К., Попова М. В. Применение термоциклической деформации для повышения эксплуатационных свойств низкоуглеродистой стали 3
- Пустовойт В. Н., Долгачев Ю. В. Структурное состояние мартенсита и остаточного аустенита в углеродистых сталях после закалки в магнитном поле 10

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ПОКРЫТИЯ

- Полевой Е. В., Козырев Н. А., Михно А. Р., Усольцев А. А., Комаров А. А. Анализ параметров микроструктуры наплавленного слоя порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V 15
- Романов Д. А., Почетуха В. В., Московский С. В., Соснин К. В., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е. Анализ структуры и свойств Cd – Ag – N-покрытия, сформированного на меди методом электронно-ионно-плазменного напыления 19
- Шляров В. В., Комаров А. А., Козырев Н. А., Полевой Е. В., Михно А. Р. Микроструктура и трибологические свойства наплавленного слоя металла, полученного дуговой наплавкой порошковой проволокой, содержащей порошок титана 27

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

- Шлярова Ю. А., Загуляев Д. В., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Шляров В. В., Прудников А. Н. Влияние двухэтапного поверхностного модифицирования на структуру силуминов Al – 11 % Si и Al – 20 % Si 34
- Пучков Ю. А., Май Суан Зунг, Плохих А. И., Бенариев И., Назаркин Р. М., Панчо Рамирес В. А. Влияние криогенной обработки и термоудара на остаточные напряжения, структуру и свойства сплава D16 43

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПОРОШКОВЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Мин П. Г., Сухов Д. И., Вадеев В. Е., Рогалев А. М. Влияние режима термической обработки на структуру и механические свойства коррозионно-стойкого жаропрочного сплава ВЖЛ718, полученного методом селективного лазерного сплавления 52

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ

- Уманский А. А., Юрьев А. Б., Симачев А. С., Думова Л. В. Исследование характерных дефектов мелющих шаров, изготовленных из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей 62

* * *

- Алфавитный указатель авторов статей, опубликованных в 2022 г. 67
- Тематический указатель статей, опубликованных в 2022 г. 71

CONTENTS

THERMAL AND THERMOMECHANICAL TREATMENT

- Afanas'ev V. K., Popova M. V. Use of thermocycling deformation for raising the operating properties of low-carbon steel 3
- Pustovoyt V. N., Dolgachev Yu. V. Structural state of martensite and retained austenite in carbon steels after quenching in magnetic field 10

THERMOCHEMICAL TREATMENT AND COATINGS

- Polevoy E. V., Kozyrev N. A., Mikhno A. R., Usol'tsev A. A., Komarov A. A. Analysis of microstructural parameters of a layer clad from Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V powder wire 15
- Romanov D. A., Pochetukha V. V., Moskovskii S. V., Sosnin K. V., Ivanov Yu. F., Gromov V. E. Analysis of the structure and properties of Cd – Ag – N coating formed on copper by electron-ion-plasma sputtering 19
- Shlyarov V. V., Komarov A. A., Kozyrev N. A., Polevoy E. V., Mikhno A. R. Microstructure and tribological properties of metal layer deposited by arc cladding of powder wire containing titanium powder 27

ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS

- Shlyarova Yu. A., Zagulyaev D. V., Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Shlyarov V. V., Prudnikov A. N. Effect of two-stage surface modification on the structure of Al – 11% Si and Al – 20% Si silumins 34
- Puchkov Yu. A., Dung Mai Xuan, Plokhikh A. I., Benarieb I., Nazarkin R. M., Pancho Ramires W. A. Effect of cryogenic treatment and thermal shock on the residual stresses, structure and properties of alloy D16 43

ADDITIVE TECHNOLOGIES, POWDER AND COMPOSITE MATERIALS

- Min P. G., Sukhov D. I., Vadeev V. E., Rogalev A. M. Effect of heat treatment mode on the structure and mechanical properties of corrosion-resistant refractory alloy VZhL718 obtained by selective laser melting 52

CONTROL OF QUALITY OF PRODUCTION PROCESSES AND MATERIALS

- Umanskii A. A., Yur'ev A. B., Simachev A. S., Dumova L. V. Investigation of typical defects of grinding balls produced from rejected continuously cast rail steel billets 10

* * *

- Author index 67
- Name index 71

Сдано в набор 01.10.2022. Подписано к печати 20.11.2022

Формат 60×84 $\frac{1}{8}$. Бумага мелованная. Печать офсетная. Цена свободная

Усл. печ. л. 8,1. Уч.-изд. л. 9,9. Заказ 22/22

Оригинал-макет подготовлен в издательстве «Фолиум»

Отпечатано в типографии издательства «Фолиум» (127238, Москва, Дмитровское ш., 157, тел. (499)258-08-28, E-mail: info@folium.ru)

Перепечатка материалов из журнала возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Применение термоциклической деформации для повышения эксплуатационных свойств низкоуглеродистой стали

В. К. АФАНАСЬЕВ, д-р техн. наук, М. В. ПОПОВА, д-р техн. наук

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия (m.popova@rdtc.ru)

Исследовано влияние термоциклической деформации и последующей термической обработки на микроструктуру и механические свойства низкоуглеродистых сталей 10кп, Ст3пс и 20 в литом состоянии и после прокатки. Проведен металлографический анализ сталей на световом микроскопе при увеличениях $\times 140$ и $\times 500$. Измерена микротвердость структурных составляющих. Определены механические свойства сталей при испытаниях на растяжение. Установлено, что после термоциклической обработки при температурах выше $A_{с3}$ происходит диспергирование всех структурных составляющих. Прочность поковок после термоциклической обработки, закалки и низкого отпуска возрастает в 1,7 – 2,4 раза при удовлетворительном уровне пластичности.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь; феррит; перлит; термоциклическая ковка; прочность; пластичность.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения механических и физических свойств металлических материалов, а также увеличения надежности и долговечности конструкций и деталей машин успешно применяются как традиционные методы термической обработки, так и комбинированные, совмещающие различные воздействия на металл в процессе формирования заготовки и конечного изделия. К ним относятся пластическая деформация (в том числе интенсивная пластическая деформация), ультразвуковая и лазерная обработка, облучение электронными пучками, воздействие электромагнитных полей и др. [1, 2]. Однако многие современные методы обработки материалов требуют применения специального дорогостоящего оборудования или характеризуются сложностью проведения и невысокой производительностью. Таких недостатков лишены методы термоциклической обработки (ТЦО), которые получили широкое распространение при обработке металлических материалов различных классов — сталей, чугунов, титановых и алюминиевых сплавов [3 – 5]. ТЦО позволяет интенсифицировать диффузионные процессы, накопить благоприятные структурные изменения, происходящие в циклах и связанные с фазовыми превращениями. Все это способствует получению мелкозернистой структуры, формированию оптимального структурно-фазового состояния и повышению уровня не только ме-

ханических, но и физических свойства сталей и сплавов [6 – 14]. Так как при ТЦО ускоряются диффузионные процессы, то ее использование при химико-термической обработке стали способствует более интенсивному насыщению поверхности деталей углеродом, азотом, бором и другими химическими элементами. В этом направлении активно работают многие исследователи [15 – 17].

Метод термоциклической деформации (ТЦД) основан на совмещении методов ТЦО и ТМО. Он представляет собой термоциклическую обработку, совмещенную с различными видами деформации в области низких, средних или высоких температур. Режим ТЦД включает технологические параметры, которые могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся: количество циклов, величина температурных интервалов и наличие выдержек в этих интервалах, скорость нагрева и охлаждения заготовок. Вторая группа включает: вид деформации, температуру и степень деформации в цикле, а также суммарную степень деформации. Выбор оптимального режима ТЦД позволяет не только улучшить физические и механические свойства сталей [18, 19], но и получить деформированные заготовки из сплавов, имеющих низкую технологическую пластичность, таких как чугуны [20, 21].

Разработка режимов ТЦД для каждой конкретной марки стали, чугуна, алюминиевого сплава имеет индивидуальный характер. Кроме того, зачастую

Таблица 1. Химический состав литых и деформированных образцов из низкоуглеродистых сталей

Сталь	Состояние	Содержание элементов, % (масс.)								
		C	Mn	Si	Cu	Cr	Ni	N	S	P
10кп	Литое	0,10	0,39	0,01	0,12	0,01	0,04	0,005	0,016	0,019
	После прокатки	0,11	0,37	0,01	0,13	0,05	0,08	0,005	0,019	0,016
Ст3пс	Литое	0,17	0,53	0,07	0,09	0,05	0,07	0,006	0,02	0,024
	После прокатки	0,19	0,57	0,05	0,07	0,04	0,07	0,007	0,012	0,015
20	Литое	0,19	0,55	0,25	0,06	0,03	0,07	0,007	0,014	0,019
	После прокатки	0,20	0,51	0,26	0,12	0,05	0,05	0,006	0,024	0,020

для получения заданных физических или механических свойств у материала одной марки, но используемого в различных условиях эксплуатации, приходится подбирать различные режимы и параметры обработки.

Цель настоящей работы — исследование влияния термоциклической деформации, включающей предварительную термоциклическую ковку слитков или заготовок из проката при температурах выше A_{c3} , на структуру и механические свойства низкоуглеродистых сталей 10кп, Ст3пс и 20.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали низкоуглеродистые стали 10кп, Ст3пс и 20. Экспериментальные слитки из указанных сталей изготавливали в кислородно-конвертерном цехе АО “ЕВРАЗ ЗСМК”. Заливку расплава проводили в чугунную изложницу с внутренними размерами $75 \times 75 \times 400$ мм. Кроме слитков, исследовали также образцы, вырезанные из проката квадратного сечения 150×150 мм или 100×100 мм. Химический состав сталей в литом и деформированном состояниях (табл. 1) определяли на эмиссионном спектрометре ARL 4460. Содержание водорода оценивали методом вакуум-нагрева в токе газа-носителя.

Термоциклическую деформацию слитков и заготовок из проката проводили в кузнечно-термическом цехе АО “ЕВРАЗ ЗСМК” по схеме однопроходной протяжки плоскими бойками на гидравлическом ковочном прессе усилием 2000 тс. Каждый цикл ТЦД включал следующие операции: 1 — нагрев до $900 - 1000$ °С с выдержкой 30 – 35 мин (перед деформацией в первом цикле проводили нагрев заготовки при 1050 ± 20 °С, 40 мин); 2 — свободная ковка заготовок в интервале $980 - 800$ °С; 3 — охлаждение поковок на воздухе до $250 - 300$ °С и затем проведение следующего цикла. Степень деформации в цикле составляла $\epsilon = 30 - 55$ %.

Схема деформации при ковке слитков сечением 75×75 мм на прутки 15×15 мм включала 6 циклов, при ковке заготовок из проката сечением

150×150 мм на прутки 15×15 мм — 5 циклов. Для получения пластин сечением 100×2 мм поковку сечением 35×35 мм подвергали еще 5 циклам деформации. Общая степень деформации после 5 – 10 циклов составляла 98 – 99,5 %. В процессековки после каждого цикла отбирали образцы для анализа структуры и свойств сталей. Из деформированных заготовок образцы вырезали вдоль направления деформации. Микротвердость структурных составляющих измеряли на микротвердомере ПМТ-3 в соответствии с требованиями ГОСТ 9450–76.

Изучение микроструктуры сталей осуществляли с помощью светового микроскопа OPTON при увеличении $\times 140$ и $\times 500$. Механические свойства образцов определяли по стандартным методикам [22]. Термическую обработку проводили в электропечах сопротивления типа СНОЛ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние термоциклической деформации на структуру сталей. Сравнительные металлографические анализы (качественный и количественный) показали, что после термоциклическойковки структура низкоуглеродистых сталей изменяется существенно образом (рис. 1 – 3; табл. 2).

При исследовании стали 10кп в литом состоянии установлено, что ее структура в донной части слитка состоит из дендритов феррита и расположенных по их границам колоний перлита (рис. 1, а). Границы зерен феррита после травления в 4%-ном спиртовом растворе HNO_3 в течение 4 с практически не выявляются. Перлитные участки в основном имеют удлиненную форму. Объемная доля перлита составляет 26 %. После первого цикла деформации, проведенного в интервале температур $950 - 850$ °С, формируется структура, состоящая из полигональных зерен феррита размерами $50 - 120$ мкм и колоний перлита (рис. 1, б). Количество перлита в центральной части поковки уменьшается до 24 % (табл. 2).

Увеличение числа циклов ТЦД приводит к измельчению структурных составляющих: размер зе-

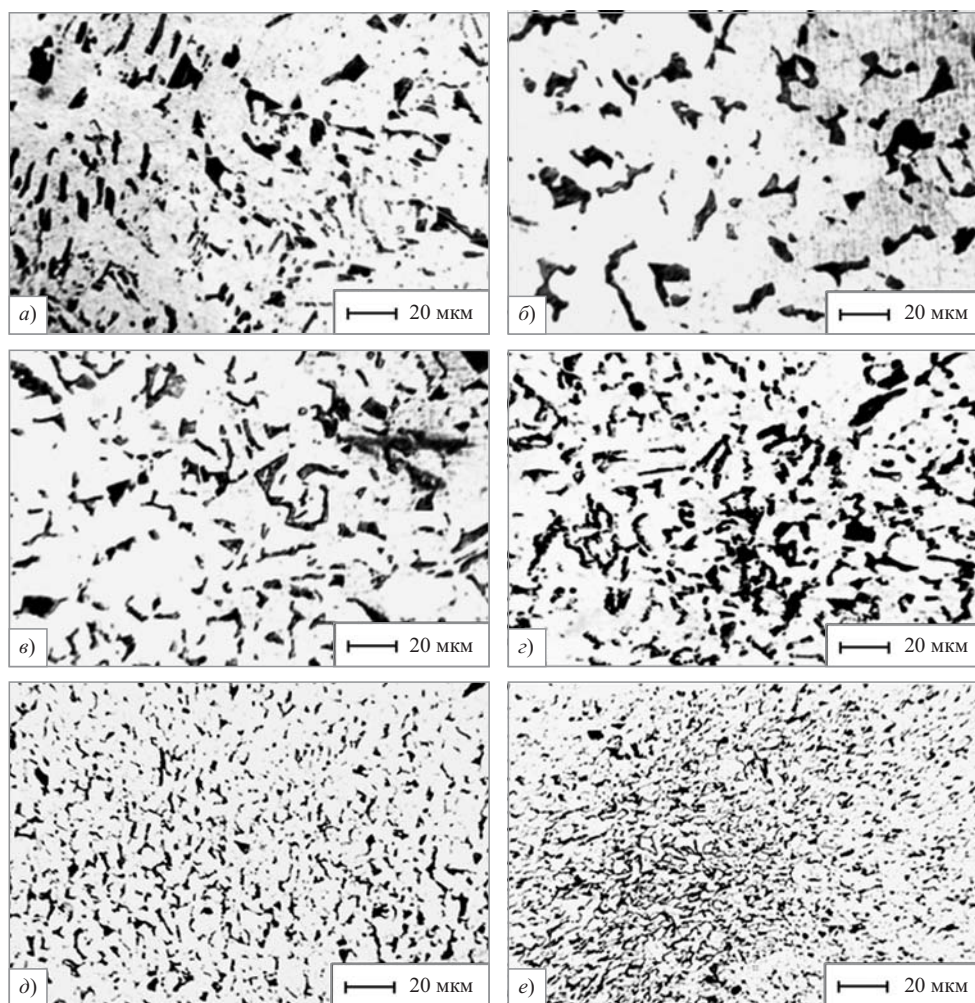


Рис. 1. Микроструктура стали 10 до и после термоциклической деформации:

a — литая сталь; *б* — один цикл ТЦД, $\varepsilon = 40\%$; *в* — два цикла ТЦД, $\varepsilon = 88\%$; *г* — четыре цикла ТЦД, $\varepsilon = 96\%$; *д* — пять циклов ТЦД, $\varepsilon = 97\%$; *е* — шесть циклов ТЦД, $\varepsilon = 99\%$

рен феррита после третьего и четвертого циклов деформации составляет 30 – 100 и 30 – 50 мкм соответственно. Наиболее сильное измельчение структуры происходило после пятого и шестого циклов обработки, проведенных в интервале температур 900 – 750 °С. Размер зерна феррита в центральной части поковки (пластина толщиной 3 мм) после 6 циклов достигает 15 – 25 мкм, уменьшаются размеры перлитных колоний и снижается объемная доля перлита до 16 – 18 %. Общее уменьшение объемной доли перлита — более 30 % (табл. 2).

Влияние термоциклическойковки на микроструктуру литой стали Ст3пс (рис. 2, см. обл.) проявлялось следующим образом. Структура литой стали состоит из дендритов феррита и перлитных участков, объемная доля перлита составляет 42 % (рис. 2, *a*). После одного цикла деформации ($\varepsilon = 49\%$), проведенной в интервале температур 980 – 800 °С, доля перлитной составляющей в структуре центральной части поковки практически не из-

менилась. Последующая циклическая ковка вызывает заметное измельчение зерен феррита и колоний перлита. При этом наблюдается преимущественная

Таблица 2. Параметры микроструктуры исследованных сталей после термоциклической деформации

Сталь	n	$d_{\text{ф}}$, мкм	$HV_{\text{ф}}$, МПа	П, % (об.)
10кп	—	80 – 200	1000	26
	1	50 – 120	1050	24
	3	30 – 100	1080	22
	4	30 – 50	1100	21
	6	15 – 25	1120	16
	—	50 – 220	1180	42
Ст3пс	1	30 – 50	1290	41
	4	10 – 20	1300	40
	5	5 – 10	1440	37
	—	50 – 220	1180	42

Обозначения: n — число циклов деформации; $d_{\text{ф}}$ — размер зерна феррита; $HV_{\text{ф}}$ — микротвердость феррита; П — объемная доля перлита ($\pm 2\%$).

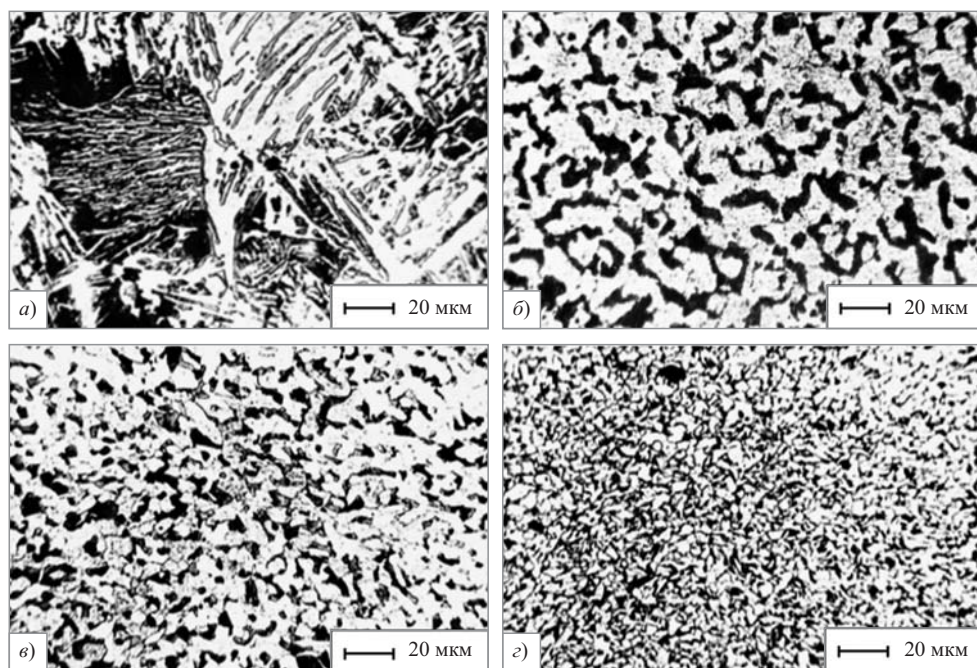


Рис. 3. Микроструктура стали 20 до и после термоциклической деформации:

a — после литья (исходное состояние); *б* — один цикл ТЦД, $\varepsilon = 37\%$; *в* — два цикла ТЦД, $\varepsilon = 75\%$; *з* — пять циклов ТЦД, $\varepsilon = 96\%$

направленность участков перлита (рис. 2, *в*). Нормализация поковки при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, проведенная после двух циклов ТЦД, приводит к более равномерному распределению колоний перлита. Объемная доля перлитной составляющей при этом не изменяется и составляет 41% . После четырех цикловковки ($\varepsilon = 88,4\%$), размеры зерен феррита достигают величины $10 - 20\text{ мкм}$. Отмечается уменьшение травимости перлитных участков, доля перлита в структуре 40% (рис. 2, *з*). После пятого цикла ТЦД происходит сфероидизация структурных составляющих, размер зерен феррита $5 - 10\text{ мкм}$. При смещении температурного интервала в пятом цикле от $900 - 750$ до $950 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ размер зерна феррита в структуре Ст3пс увеличивается до $20 - 35\text{ мкм}$, доля перлита при этом составляет 37% .

Циклическая деформация заготовок из прокатанной стали 3пс, проведенная в интервале температур $950 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, приводит к заметным изменениям в структуре после трех циклов (рис. 2, *д - з*). Зерна феррита приобретают вытянутую форму, колонии перлита вытягиваются вдоль границ ферритных зерен. Размеры зерен феррита после пяти циклов ТЦД уменьшаются от $80 - 100$ до $20 - 30\text{ мкм}$. Количество перлитной составляющей изменяется незначительно: от 41 до 37% (на 9%).

При металлографическом исследовании стали 20 после ТЦД установлено, что ее структура, имеющая в литом состоянии дендритное строение, претерпевает значительные изменения уже после двух циклов

ТЦД (рис. 3, *a - в*). Размер зерна феррита уменьшается от $200 - 250$ до $60 - 70\text{ мкм}$. При увеличении числа циклов деформации структура стали становится более дисперсной. После пяти цикловковки размер зерна феррита достигает $10 - 20\text{ мкм}$ (рис. 3, *з*). Следует отметить заметное уменьшение доли перлитной составляющей в процессе ТЦД. Так, в литой стали 20 объемная доля перлита составляет 41% , а после пяти цикловковки $33 - 35\%$.

Анализ результатов металлографических исследований позволил выявить ряд закономерностей, наблюдаемых при формировании структуры сталей в процессе ТЦД. Показано, что такая деформация приводит к измельчению всех структурных составляющих: ферритных зерен и перлитных колоний. Степень дисперсности структуры зависит от температуры деформации и числа циклов.

Установлено, что в результате ТЦД низкоуглеродистых сталей в их структуре происходит уменьшение объемной доли перлита. Однако такое изменение количества перлита не связано с обезуглероживанием. Согласно данным химического анализа сталей, приведенным в табл. 3, концентрация углерода в них после ТЦД не изменяется. В то же время, из результатов газового анализа следует, что содержание водорода в сталях после пяти цикловковки становится ниже на $38 - 50\%$, чем в исходном литом состоянии. При этом установлено, что при ТЦД заготовок из проката содержание диффузионно-подвижного водо-

Таблица 3. Химический состав и содержание водорода в исследованных сталях до и после термоциклической деформации

Сталь	Исходное состояние	Содержание элементов, % (масс.)			[H], см ³ /100 г Ме
		C	Si	Mn	
10кп	Литое	0,10/0,11	0,01/0,01	0,39/0,41	1,00/0,50
	После прокатки	0,11/0,11	0,01/0,01	0,37/0,35	0,60/0,45
СтЗпс	Литое	0,17/0,18	0,07/0,07	0,53/0,53	1,20/0,75
	После прокатки	0,19/0,18	0,05/0,07	0,57/0,53	0,75/0,60

Примечание. В числителе дано содержание элементов и водорода ([H] — на 100 г металла) до термоциклической деформации, в знаменателе — после нее.

рода в них снижается менее существенно — на 10 – 25 %.

При сопоставлении зависимостей, полученных методами количественной металлографии и газового анализа, можно констатировать, что изменение объемной доли перлита в процессе ТЦД тем больше, чем ниже содержание водорода в стали после термоциклической деформации.

Влияние термоциклической деформации на механические свойства. Механические испытания исследуемых низкоуглеродистых сталей до и после ТЦД показали, что такая деформация способствует повышению их прочности при некотором уменьшении пластичности: относительное удлинение уменьшается в 1,5 – 1,8 раза, но относительное сужение изменяется весьма мало (табл. 4). Повышение прочности объясняется уменьшением размеров зерна феррита и увеличением его микротвердости после ТЦД (табл. 2). Такое изменение свойств дает основания предположить, что совместное воздействие термоциклической деформации и упрочняющей термической обработки позволит еще более значительно повысить прочностные свойства изучаемых сталей по сравнению со свойствами сталей заводского изготовления в состоянии поставки.

Результаты определения механических свойств показали, что предварительная ТЦД увеличивает

восприимчивость низкоуглеродистой стали, содержащей не более 0,11 % С, к упрочняющей термической обработке. После закалки с низким отпуском предел прочности стали 10кп увеличивается в 1,7 раза — до $\sigma_b = 970$ МПа, что недостижимо для стали заводского изготовления. Столь существенное повышение предела прочности, вероятно, объясняется значительным уменьшением размеров всех структурных составляющих после ТЦД и повышенной диффузионной подвижностью элементов внедрения в термоциклированной стали, что влияет на температуры фазовых превращений [5]. Металлографический анализ позволил установить, что закалка от температуры, превышающей A_{c3} на 45 °С, способствует образованию структуры промежуточного бейнитного превращения (рис. 4). При этом полосчатость, характерная для структуры поковок, исчезает.

С увеличением содержания углерода в стали эффект упрочнения поковок становится более выраженным (табл. 4). Так, после закалки и низкого отпуска поковок из стали Зпс предел прочности увеличился в 2,4 раза — до $\sigma_b = 1350$ МПа. Характеристики пластичности при этом имеют невысокие, но приемлемые для конструкционного материала значения.

Таким образом установлено, что совместное воздействие термоциклическойковки и закалки с низким отпуском позволяет получить у низкоуглероди-

Таблица 4. Механические свойства поковок из низкоуглеродистых сталей, полученных методом ТЦД, после термической обработки

Сталь	Обработка	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
10кп	Прокатка (исходное состояние)	375 – 410	34	67
	10 циклов ТЦД	520 – 548	12 – 14	66 – 68
	ТЦД + закалка от 920 °С (30 мин)	825	6	57
	ТЦД + закалка от 920 °С (30 мин) + отпуск при 200 °С, 1 ч	970	5	50
СтЗпс	Прокатка (исходное состояние)	465 – 485	32 – 35	68
	10 циклов ТЦД	510 – 550	16 – 19	65 – 69
	ТЦД + закалка от 880 °С (30 мин)	1434	4	17
	ТЦД + закалка от 880 °С (30 мин) + отпуск при 200 °С, 1 ч	1350	5	41

Примечание. Закалку образцов проводили в воде, а охлаждение после отпуска — на воздухе.

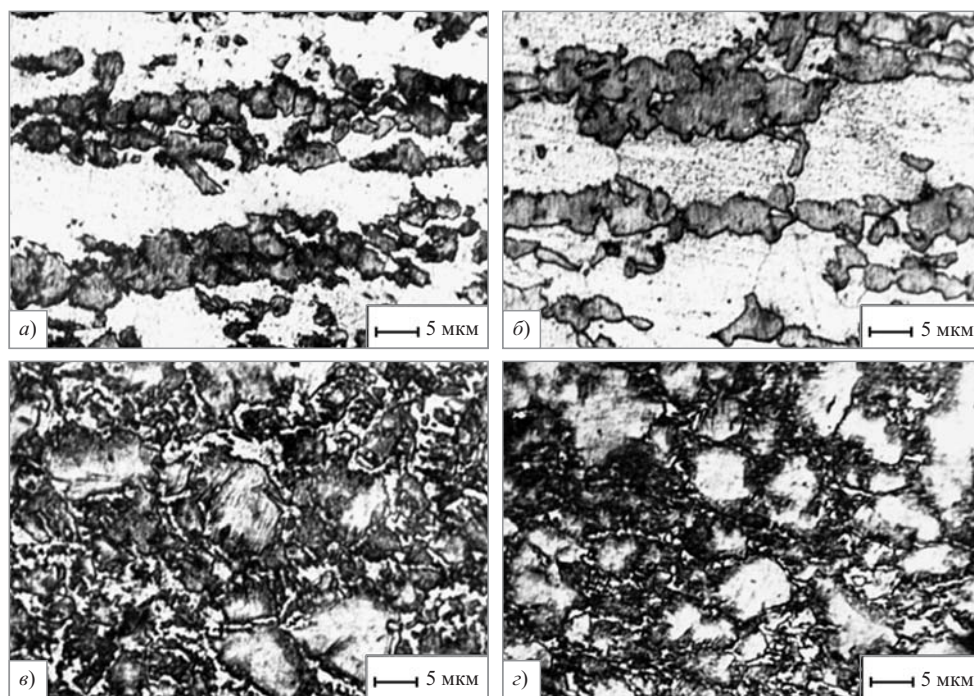


Рис. 4. Микроструктура поковок из стали 10 в различных состояниях:

а, б — послековки (исходное состояние); *в, г* — после 10 циклов ТЦД, закалки от 920 °С в воде и отпуски при 200 °С, 1 ч; *а, в* — головка образца; *б, г* — рабочая часть

стых сталей, слабо восприимчивых к упрочняющей термической обработке в обычных условиях, существенное (в 1,7 – 2,4 раза) повышение прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате термоциклическойковки при температурах выше A_{c3} низкоуглеродистых сталей 10кп, СтЗпс и 20 происходит измельчение всех структурных составляющих. Степень дисперсности структуры сталей зависит от температуры деформации и числа циклов. После пяти циклов деформации происходит уменьшение объемной доли перлита в структуре сталей на 9 – 30 %. Показано, что изменение объемной доли перлита в процессе ТЦД тем больше, чем меньше содержание водорода в стали.

Поковки из изученных сталей после термоциклической деформации имеют более высокую прочность, чем деформированные заготовки, полученные по заводским режимам, при некотором снижении характеристик пластичности. Проведение термоциклической деформации и последующей упрочняющей термической обработки обеспечивает прирост прочности сталей в 1,7 – 2,4 раза при удовлетворительном уровне пластичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перспективные материалы и технологии.* Монография в 2 томах / Под редакцией В. В. Клубовича. Витебск: Изд-во УО “ВГТУ”, 2017. Т. 1. 467 с.
2. *Перспективные материалы и технологии.* Монография в 2 томах / Под ред. чл.-корр. наук В. В. Рубаника. Витебск: Изд-во УО “ВГТУ”, 2019. Т. 2. 317 с.
3. Федюкин В. К., Смагоринский М. Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Ленинград: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1989. 255 с.
4. Федюкин В. К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 144 с.
5. Баранов А. А. Фазовые превращения и термоциклирование металлов. Киев: Наукова думка, 1974. 232 с.
6. Nasiri Z., Ghaemifar S., Naghizadeh M. et al. Thermal mechanisms of grain refinement in steels: A review // *Met. Mater. Int.* 2021. V. 27. P. 2078 – 2094 (DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00700-1>).
7. Song R. et al. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels // *Materials Science and Engineering: A.* 2006. V. 441, No. 1 – 2. P. 1 – 17 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.095>).
8. Tsuji N., Maki T. Enhanced structural refinement by combining phase transformation and plastic deformation in steels // *Scripta Materialia.* 2009. V. 60, No. 12. P. 1044 – 1049 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.028>).
9. Kyaw Zaya, Thet Paing, Kornilova A. V. The effects of operational thermal cycling on mechanical and magnetic properties of structural steels // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. No. 675. P. 012041 (DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012041>).
10. Subhani A. R. et al. Development of a high-strength low-carbon steel with reasonable ductility through thermal cycling // *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2019. V. 28, No. 4. P. 2192 – 2201 (DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-03969-5>).
11. Hidalgo J., Santofimia M. J. Effect of prior austenite grain size refinement by thermal cycling on the microstructural features of as-quenched lath martensite // *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2016. V. 47, No. 11. P. 5288 – 5301 (DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3525-4>).
12. Maity J., Saha A., Mondal D. K., Biswas K. Mechanism of accelerated spheroidization of steel during cyclic heat treatment

- around the upper critical temperature // *Philos. Mag. Lett.* 2013. V. 93. P. 231 – 237 (DOI: <https://doi.org/10.1080/09500839.2012.758390>).
13. Bondareva O. P., Sedov E. V., Gonik I. L. Effect of thermal cycling treatment on structure and properties of ferritic-austenitic steel welded joint heat-affected zone metal // *Chem. Pet. Eng.* 2016. V. 52. P. 506 – 511 (DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-016-0223-4>).
 14. Попова М. В., Кривичева Н. В. Особенности влияния термоциклической обработки на тепловое расширение сплава Al – 15 % Si // *Известия вузов. Черная металлургия.* 2009. № 4. С. 56 – 57.
 15. Башинин Ю. А. Термоциклическая нитроцементация шестерен // *МиТОМ.* 1984. № 4. С. 14 – 15.
 16. Семенова Л. М., Семенов С. В., Крайнова С. Н. Химико-термическая обработка стали 20Х в условиях циклического изменения температуры // *МиТОМ.* 2003. № 7. С. 3 – 7.
 17. Гурьев А. М., Ворошин Л. Г., Хараев Ю. П. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей // *Ползуновский вестник: часть 2.* 2005. № 2. С. 36 – 44.
 18. Афанасьев В. К., Столбов А. А., Золотовский А. А. и др. О воздействии термоциклической деформации и последующей термообработки на свойства малоуглеродистой стали // *Известия вузов. Черная металлургия.* 1994. № 2. С. 37 – 39.
 19. Афанасьев В. К., Прудников А. Н., Попова М. В. и др. Влияние термоциклической деформации и отжига на структуру и удельное электрическое сопротивление стали марки СтЗпс // *Сб. материалов 1-ой Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы в машиностроении"*. Новосибирск: изд-во НГТУ. 2014. С. 431 – 434.
 20. Афанасьев В. К., Попова М. В., Долгова С. В. и др. Микроструктура и свойства доменного чугуна после термоциклической обработки // *Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXII Международной научно-практической конференции.* В 2-х частях. Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ. 2021. Часть 1. С. 208 – 212.
 21. Афанасьев В. К., Попова М. В., Долгова С. В. и др. Воздействие обработки расплава и циклической деформации на микроструктуру доменного чугуна // *Актуальные проблемы в машиностроении.* 2021. Т. 8, № 1 – 2. С. 65 – 71.
 22. Золоторевский В. С. *Механические свойства металлов.* 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСиС. 1998. 400 с.

Статья поступила в редакцию 13.07.2022 г.

Use of thermocycling deformation for raising the operating properties of low-carbon steel

V. K. Afanas'ev and M. V. Popova

Siberian State University, Novokuznetsk, Russia

The effect of thermocycling deformation and subsequent heat treatment on the microstructure and mechanical properties of low-carbon steels 10kp, St3ps and 20 is studied in cast condition and after rolling. Metallographic analysis of the steels is performed using an optical microscope at a magnification of $\times 140$ and $\times 500$. The microhardness of the structural components is measured. The mechanical properties of the steels are determined in tensile tests. It is shown that after the thermocycling treatment above the temperature A_{c3} all the structural components are refined. The strength of the forgings after the thermocycling treatment, quenching and low tempering increases by a factor of 1.7 – 2.4 at a satisfactory level of ductility.

Key words: low-carbon steel, ferrite, pearlite, thermocycling forging, strength, ductility.