

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 22. Выпуск 5.

УДК 620.1: 621.78

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-5-328-339

Влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства термомеханически упрочненного арматурного проката

Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. В. Родионов, А. Е. Гвоздев,
О. В. Кузовлева, Е. С. Крупицын

Сергеев Николай Николаевич — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: technology@tspu.tula.ru

Сергеев Александр Николаевич — доктор педагогических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: ansergueev@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Родионов Александр Валерьевич — Тульский государственный университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: rodionovalexandr@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Кузовлева Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Крупицын Евгений Станиславович — кандидат физико-математических наук, Московский педагогический государственный университет (г. Москва).

e-mail: krupitsin@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрено влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства малоуглеродистых арматурных сталей марок Ст3 и Ст5. Установлено, что сталь марки Ст3 в прутках $\varnothing 14$ мм эффективно обрабатывается способом ВТМО, упрочняясь до уровня 3-го класса. Механические свойства, зафиксированные непосредственно после ВТМО, устойчиво сохраняются после отпуска электронагревом до температур 350...370°C. Выявлено, что после отпуска при температуре 500...550°C в стали Ст5 сохраняется упрочнение на уровне 6-го класса прочности только при условии, если нагрев осуществляется по скоростному режиму (28 °C/сек). Показано, что субструктура, созданная в ходе ВТМО, разрушается при ускоренном отпуске в меньшей (мере) степени, чем после печного. Все это предопределяет более высокий уровень упрочнения стали в результате ВТМО и скоростного отпуска.

Ключевые слова: арматурная сталь, механические свойства, отпуск, высокотемпературная термомеханическая обработка.

Библиография: 16 названия.

Для цитирования:

Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. В. Родионов, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева, Е. С. Крупицын, . Влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства термомеханически упроченного арматурного проката // Чебышевский сборник, 2021, т. 22, вып. 5, с. 328–339.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 22. No. 5.

UDC 620.1: 621.78

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-5-328-339

The effect of the tempering temperature on the structure and mechanical properties of thermomechanically strengthened rebar rolled products

N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, S. N. Kutepov, A. V. Rodionov, A. E. Gvozdev,
O. V. Kuzovleva, E. S. Krupitsyn

Sergeev Nikolai Nikolaevich — doctor of technical sciences, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: technology@tspu.tula.ru

Sergeev Alexander Nikolaevich — doctor of pedagogical sciences, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: ansergueev@mail.ru

Kutepov Sergey Nikolaevich — candidate of pedagogical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Rodionov Alexander Valer'evich — Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: rodionovalexandr@mail.ru

Gvozdev Alexander Evgenievich — doctor of engineering, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Kuzovleva Olga Vladimirovna — candidate of technical sciences, docent, Russian State University of Justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Krupitsyn Evgeny Stanislavovich — candidate of physical and mathematical sciences, Moscow Pedagogical State University (Moscow).

e-mail: krupitsin@gmail.com

Abstract

The article considers the influence of the tempering temperature on the structure and mechanical properties of low-carbon reinforcing steels of grades St3 and St5. It is established that steel of the St3 brand in bars $\varnothing 14$ mm is effectively processed by the VTMO method, being strengthened to the level of the 3rd class. The mechanical properties recorded directly after the VTMO are steadily preserved after the release by electric heating to temperatures of 350...370°C. It was found that after tempering at a temperature of 500...550°C, the hardening in St5 steel remains at the level of the 6th strength class only if the heating is carried out according to the speed mode (28° C/sec). It is shown that the substructure created during VTMO is destroyed during accelerated tempering to a lesser (to a lesser) extent than after

furnace tempering. All this determines a higher level of steel hardening as a result of VTMO and high-speed tempering.

Keywords: reinforcing steel, mechanical properties, tempering, high-temperature thermomechanical treatment.

Bibliography: 16 titles.

For citation:

N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, S. N. Kutepov, A. V. Rodionov, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, E. S. Krupitsyn, , 2021, “The effect of the tempering temperature on the structure and mechanical properties of thermomechanically strengthened rebar rolled products”, *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22, no. 5, pp. 328–339.

1. Введение

Арматурная сталь является составной частью железобетона и на всех стадиях изготовления и эксплуатации железобетонных конструкций должна удовлетворять следующим основным требованиям [1]: иметь необходимые прочностные свойства, пластичность при кратковременных и длительных нагрузках, а также в условиях повышенных и пониженных температур, коррозионных воздействий и т. д. Кроме того, необходимо сцепление арматурной стали с бетоном за счёт соответствующего периодического профиля или специальных анкеров.

Одним из наиболее эффективных путей улучшения качества арматурного проката из углеродистых и низколегированных сталей является применение операций термической обработки [2]. Термическое упрочнение, осуществляемое как с прокатного, так и с отдельного нагрева, повышает в 1,5–2 раза прочность и значительно увеличивает усталостные характеристики проката, в результате чего возможно сэкономить 10–50% металла при изготовлении железобетонных конструкций.

Физико-механические свойства арматурного проката в значительной степени зависят от химического состава сталей, способа производства и режимов термической обработки [3, 4]. В связи с этим, для каждой марки стали необходимо экспериментально подбирать оптимальные режимы термообработки, обеспечивающие высокие значения физико-механических характеристик.

Цель настоящей работы — исследование влияния термической обработки на структуру и механические свойства малоуглеродистых арматурных сталей марок Ст3 и Ст5.

2. Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны арматурные стали марок Ст3 и Ст5 $\varnothing 14$ мм упрочненные методом высокотемпературной термомеханической обработки (VTMO). VTMO проводили в условиях, при которых процессы рекристаллизации деформированного аустенита частично или полностью подавляются, а процесс полигонизации получает наибольшее развитие с целью формирования развитой субструктуры аустенита, наследуемой мартенситом при последующей закалке.

Арматурные стержни $\varnothing 14$ мм отпускали при температурах 200 . . . 600°C через 100 или 50°C с различной интенсивностью нагрева:

- а) в электропечи с выдержкой в течение часа;
- б) электронагревом — пропусканием тока силой 700, 3500 и 5000 А.

Интенсивность электронагрева прутков в зависимости от силы тока представлена на рисунке 1. Пропускание тока через прутки прекращали по достижении заданной температуры. Такой режим нагрева применяется при электротермическом способе натяжения стержней при производстве предварительно напряженных конструкций.

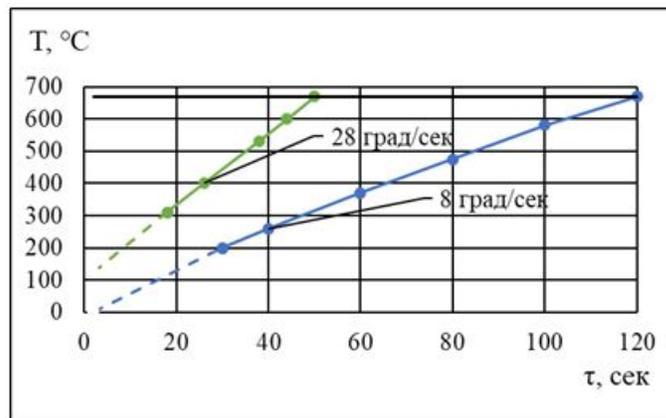


Рис. 1: Время ускоренного ($8^{\circ}\text{C}/\text{с}$) и скоростного ($28^{\circ}\text{C}/\text{с}$) электронагрева стальных прутков $\varnothing 14$ мм в зависимости от температуры отпуска

Температуру отпуска контролировали двумя хромель-копелевыми термопарами, спай которых закреплялся в отверстиях, высверленных в середине и у края прутков.

Отпущенные прутки в виде натуральных образцов ($\varnothing 14$ мм и $l = 250$ мм) подвергали испытанию на растяжение для определения механических свойств согласно ГОСТ 12004-81. Подготовленные образцы исследовали под микроскопом, а также подвергали рентгеноструктурному анализу с целью определения тонкого строения стали. Электронно-микроскопические исследования проводили на микроскопе ЭМВ-1001 с применением метода лаковых реплик. Контрольные образцы подвергали обычной закалке и отпуску.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Влияние отпуска на механические свойства стали после ВТМО

На рисунке (2) показано изменение механических свойств в зависимости от температуры отпуска и интенсивности нагрева стали высоко-прочного состояния после ВТМО ($\sigma_B = 1760$ МПа, $\delta = 6,5\%$).

Характер изменения кривых прочностных и пластических свойств в зависимости от температуры отпуска — печного и электронагревом — одинаков, однако после отпуска электронагревом прочностные характеристики стали выше, чем при обычном печном нагреве. Наиболее сильное разупрочнение стали с повышением температуры отпуска происходит в условиях печного нагрева с выдержкой 1 час. Например, отпуск при 400°C разупрочняет сталь до уровня 5-го, а при 450°C — до 4-го классов прочности. В то же время, при скоростном отпуске высокий комплекс свойств сохраняется вплоть до температур 600°C (Ат800, Ат600).

Электронагрев термомеханически упрочненной стали до различных температур без последующей выдержки выявляет тем большую термическую устойчивость, чем интенсивнее проводили нагрев. Например, после ускоренного нагрева (ток 3500 А) до 450°C в стали сохраняется упрочнение на уровне 6-го класса, а после скоростного нагрева ($28^{\circ}\text{C}/\text{сек}$) — на уровне 7-го класса прочности.

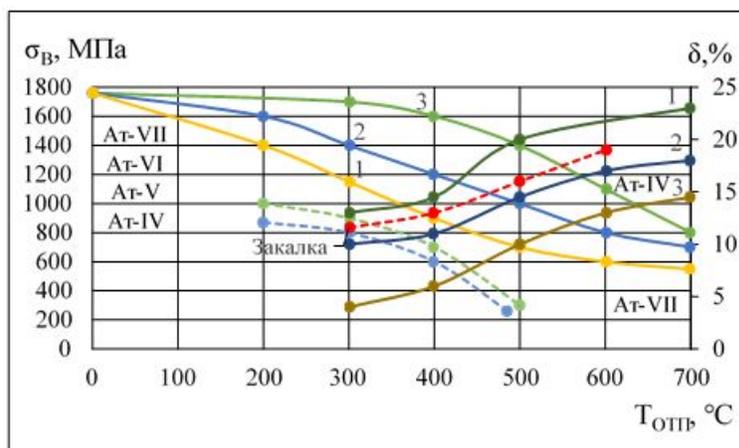


Рис. 2: Изменение механических свойств высокопрочной стали Ст5 (7-й класс прочности) в зависимости от температуры и интенсивности нагрева: 1) нагрев в электропечи, с выдержкой 1 час; 2) нагрев пропусканием тока силой 3500 А; 3) нагрев пропусканием тока силой 5000 А

Пластические характеристики после всех режимов отпуска удовлетворяют требованиям, приведенным в [5]. Таким образом, высокопрочная стержневая арматура после ВТМО и отпуска с электронагрева до температуры 450°С в течение 1 мин без выдержки при этой температуре (в настоящем эксперименте режим ускоренного нагрева) в полной степени отвечает требованиям к арматуре 6-го класса прочности.

Высокая термическая устойчивость термомеханически упрочненной стали полнее проявляется при ее сравнении с термической устойчивостью, обычно закаленной стали. На рисунке 2 хорошо виден крутой ход кривой изменения прочностных характеристик закаленной стали на фоне аналогичных кривых высокопрочной стали как при печном, так и ускоренном нагреве до температуры 400°С, т.е. резкое разупрочнение закаленной стали, при котором предел прочности понижается до 900...950 МПа (4-й класс прочности). Тем самым исключается важность достижения прочностных свойств в стали марки Ст5 на уровне 5-го и тем более 6-го классов за счёт закалки и последующего отпуска электронагревом до температур 400...500°С (температура электронагрева арматуры при производстве напряженных железобетонных конструкций).

Изменение механических свойств в зависимости от температуры отпуска стали марки Ст5, упрочненной способом ВТМО до уровней классов прочности Ат400, Ат600, Ат800 показано на рисунке 3. Отпуск электро-нагревом проводили на установке заводского типа с использованием сварочного трансформатора, сила тока составляла 700 А, нагревали прутки Ø14 мм, длиной 3000 мм, время нагрева составляло 1,5...3 мин. Для сравнения отпускали прутки печным нагревом.

Из рисунка 3 видно, что после отпуска с электронагрева прочностные характеристики стали выше, чем при печном нагреве, кроме того, заметного разупрочнения не наблюдается до 450°С для прутков всех трёх исследуемых состояний, упрочнение сохраняется на уровне класса прочности, полученного непосредственно после ВТМО. Это объясняется как высокой устойчивостью дислокационной субструктуры, созданной в ходе ВТМО, так и проходящими процессами самоотпуска за счёт сохранившегося в прутках тепла после прекращения их охлаждения в закалывающем устройстве.

Наблюдаемый в сталях классов прочности Ат600 и Ат800 эффект упрочнения при температуре отпуска связывают с изменением тонкого кристаллического строения — резким измельчением блоков.

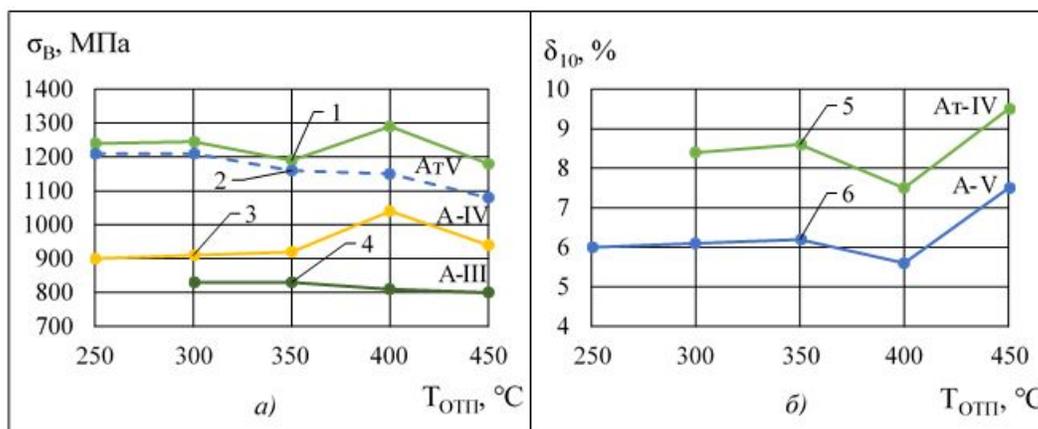


Рис. 3: Изменение предела прочности (а) и относительного удлинения (б) стали Ст5 от температуры отпуска после ВТМО до 3, 4 и 5 классов прочности: 1; 2; 6 — электронагрев; 3; 4; 5 — печной отпуск

Изменение механических свойств стали Ст3, прошедшей ВТМО, от температуры отпуска показано на рисунке 4. Прочностные характеристики этой стали при отпуске с электронагрева (сила тока 700 А, время нагрева 1, 5... 3 мин) сохраняются на уровне свойств, достигнутом непосредственно после ВТМО, при нагреве не выше 350°C, задел предел прочности и предел текучести значительно снижаются при 400°C и более плавно при 450 и 500°. Однако уровень упрочнения после отпуска при 400°C сохраняется высоким. Например, предел прочности снизился с 1050 до 900 МПа, а предел текучести с 900 до 850 МПа, т.е. сталь марки Ст3 можно гарантированно упрочнять способом ВТМО до уровня 3 и 4-го классов прочности и поставлять заказчику в качестве арматуры 3-го класса без опасения снижения прочностных свойств при последующем электронагреве до 350... 370°C.

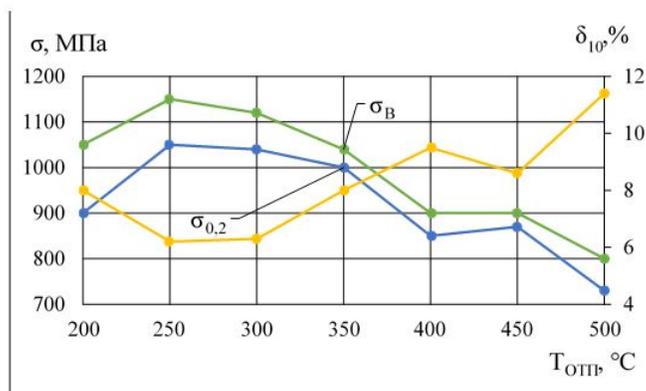


Рис. 4: Зависимость механических свойств стали Ст3, прошедшей ВТМО от температуры отпуска с электронагрева

В таблице 1 представлены результаты испытаний на растяжение натуральных образцов, отобранных от переднего и заднего конца 80-ти метрового прутка и отпущенных в печи с температур 400... 600°C.

Таблица 1: Механические свойства стали Ст5 после ВТМО и печного отпуска

Механические характеристики	Температура отпуска, °С				
	20	300	400	500	600
σ_B , МПа	1600	1100	980	790	660
	1700	1200	1030	830	700
Класс прочности	Ат1200	Ат800	Ат600	Ат400	Ат400

Примечание: в числителе приведены механические свойства образцов, вырезанных из начала прутка, а в знаменателе из конца прутка.

Из таблицы 1 видно, что разница в значениях прочности переднего и заднего концов прутка заметно не изменяется до температуры отпуска $300 \dots 350^\circ\text{C}$ и составляет $1200 \dots 1000$ МПа. Минимальная температура печного отпуска, которая выравнивает прочностные свойства по длине 80-ти метрового прутка и в то же время обеспечивает достаточно высокий класс прочности (Ат600), должна приниматься не ниже 400°C . В случае ускоренного нагрева, когда распад мартенсита задерживается, температура отпуска с целью сближения прочностных свойств должна быть выше.

3.2. Микроструктура и тонкое строение стали после ВТМО и отпуска

Отпуск, как завершающая термическая обработка закаленных сталей, уменьшает уровень закалочных напряжений и формирует эксплуатационные свойства. При мартенситном превращении неупорядоченный раствор внедрения атомов углерода в аустените переходит в упорядоченный раствор в мартенсите с расположением атомов углерода в октаэдрических порах вдоль оси «С», чем вызывается образование тетрагональной решётки мартенсита. Метастабильное состояние закаленной стали, вызванное пересыщенностью углеродом мартенсита (степень тетрагональности решётки мартенсита), повышенной плотностью дефектов решётки (дислокаций и пр.) и присутствием остаточного аустенита, при отпуске стабилизируется вследствие протекания ряда процессов [6].

Выдержка мартенсита уже при комнатной температуре, а также при нагреве до $80 \dots 100^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению его тетрагональности, что вызвано диффузией атомов углерода и дефектам решетки мартенсита — образование примесных атмосфер, обогащенных углеродом.

В процессе первого превращения при отпуске закалённой стали образуется метастабильный ϵ -карбид, отличающийся от цементита типом кристаллической решётки (гексагональная у ϵ -карбида), пониженным содержанием углерода. Частица ϵ -карбида когерентно связана с кристалло-графической решёткой мартенсита. Первое превращение при отпуске характерно, кроме того, протеканием так называемого двухфазного распада мартенсита: образование карбидных пластин за счёт углерода из ближайшего мартенситного окружения (вследствие малой подвижности атомов углерода), в результате чего мартенсит оказывается неоднородным в различных участках по содержанию углерода.

Второе превращение при отпуске характеризуется распадом остаточного аустенита и продолжающимся распадом мартенсита на α -раствор с концентрацией по углероду $0,15 \dots 0,20\%$ и тонкие пластинки цементита — структура нижнего бейнита или отпущенного мартенсита игольчатого строения. Конечные продукты распада аустенита те же, что и продукты распада мартенсита при данной температуре.

В результате третьего превращения при отпуске распад мартенсита завершается переходом в равновесный (без избытка углерода) феррит и обособленный карбид (нарушается когерентность) с образованием сильно травящейся двухфазной структуры, наследуемой игольчатое строение мартенсита — троостит отпуска.

Дальнейшее повышение температуры отпуска — четвёртое превращение — сопровождается стабилизацией структуры цементита: их ростом и сфероидизацией (округлением), уменьшением плотности дислокаций и укреплением блоков мозаичной структуры ферритной матрицы в результате развития ранних стадий рекристаллизации, формируется зернистая структура из ферритно-цементитной смеси, называемая сорбитом отпуска.

Указанная последовательность превращений в условиях медленного печного нагрева нарушается при скоростном нагреве, который, кроме того, вносит некоторые особенности в протекании фазовых превращений.

После печного отпуска при 300°C структура стали характеризуется относительно равномерным распределением карбидных частиц. Ускоренный нагрев, в отличие от печного, приводит к образованию сетки более мелких карбидов по границам блоков и зёрен α -фазы.

Повышение температуры отпуска до 400°C сопровождается выделением карбидов преимущественно в виде сетки по границам блоков и зёрен также и после печного нагрева. В структуре стали ускоренного отпуска карбидная сетка выглядит более отчётливо сформированной, карбиды по размеру мельче, их форма преимущественно пластинчатая, а не равноосная как после печного нагрева. Микроструктура, выявленная с помощью оптического микроскопа, также отражает различие в протекании превращений при печном и ускоренном отпуске. На микроснимке после печного отпуска не наблюдается игольчатое строение стали и отчётливо прослеживается начальная стадия сфероидизации карбидов. Ускоренному отпуску при той же температуре отвечает еще различная микроструктура, на фоне которой видны дисперсные карбиды.

Весьма интенсивный процесс сфероидизации карбидов при печном отпуске наблюдается при 450°C и более высокой температуре. На фоне ферритной матрицы обнаруживаются равноосные зерна цементита. Такой характер микроструктуры свидетельствует о том, что фазовые превращения при отпуске — распад мартенсита и остаточного аустенита в основном закончились. Подобная структура в стали после ускоренного отпуска наблюдалась лишь при температурах 550°C.

Все выявленные нами особенности строения стали после ускоренного отпуска в интервале температур 300...450°C, такие, как преимущественное образование сетки карбидов по границам блоков и зёрен, выделение дисперсных карбидных частиц с преобладанием пластинчатой формы, сохранение игольчатого строения до более высоких температур отпуска, и, наконец, более позднее развитие процесса сфероидизации подтверждает тормозящее влияние ускоренного нагрева на превращения, протекающие при отпуске термомеханически упрочнённой стали марки Ст5.

Это подтверждается также данными изменения тонкого строения стали (табл. 2). Из таблицы 2 видно, что субструктура, созданная в ходе ВТМО, разрушается при ускоренном отпуске в меньшей степени, чем после печного. Это предопределяет более высокий уровень упрочнения стали в результате ВТМО и скоростного его отпуска. Изменение характеристик тонкого строения стали Ст3 после ВТМО и отпуска показано на рисунке 5.

Таблица 2: Изменение характеристик тонкого строения стали Ст5 после ВТМО и отпуска — печного и с электронагрева

Режим нагрева	Размер блоков	Микроискажения 2-го рода	Плотность дислокаций см ⁻²
Печной — 1 час	$0,5 \times 10^{-4}$	$0,081 \times 10^{-3}$	$4,4 \times 10^{10}$
Электронагрев — 10 сек	$0,1 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{11}$

Из анализа рисунка 5 видно, что разрушение субструктуры происходит в интервале тем-

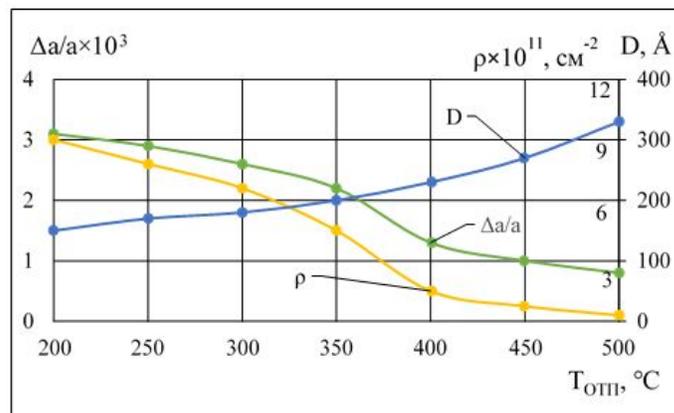


Рис. 5: Изменение характеристик тонкого строения стали Ст3 после ВТМО и отпуска с электронагрева

ператур 350...400°C, в котором наблюдается наиболее резкое снижение плотности дислокаций и микроискажений 2-го рода — характеристик, с которыми связывают упрочнение стали. Именно в этом температурном интервале происходит резкое понижение предела прочности и предела текучести при отпуске (см. рис. 4).

4. Заключение

1. Установлено, что сталь марки Ст3 в прутках $\varnothing 14$ мм эффективно обрабатывается способом ВТМО, упрочняясь до уровня 3-го класса. Механические свойства, зафиксированные непосредственно после ВТМО, устойчиво сохраняются после отпуска электронагревом до температур 350...370°C.
2. Показано, что высокопрочная стержневая арматура из стали марки Ст5 после ВТМО и отпуска с электронагрева до температур 450°C в течение 1...1,5 мин без выдержки при этой температуре отвечает требованиям, предъявляемым к арматуре 6-го класса прочности.
3. Выявлено, что после отпуска при температуре 500...550°C в стали Ст5 сохраняется упрочнение на уровне 6-го класса прочности только при условии, если нагрев осуществляется по скоростному режиму (28°C/сек).
4. Выявленные в настоящей работе особенности строения стали после ускоренного отпуска: преимущественное образование сетки карбидов по границам блоков и зёрен, пластинчатая форма карбидов высокой дисперсности, сохранение игольчатого строения до более высоких температур отпуска и более позднее развитие процесса сфероидизации подтверждают тормозящее влияние ускоренного нагрева на превращения, протекающие при отпуске. Исследованием также установлено, что субструктура, созданная в ходе ВТМО, разрушается при ускоренном отпуске в меньшей (мере) степени, чем после печного. Все это предопределяет более высокий уровень упрочнения стали в результате ВТМО и скоростного отпуска.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки различных материалов [7]-[16].

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокопрочная арматурная сталь / А. А. Кугушин, И. Г. Узлов, В. В. Калмыков, С. А. Мадатян, И. В. Ивченко. — М.: Металлургия, 1986. 272 с.
2. Узлов Г. И. Термическое упрочнение проката — эффективный путь экономии металла // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1985. — №8. — С.18–21.
3. Исследование влияния легирования на механические и коррозионные свойства арматурного проката / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, А. Н. Чуканов, С. Н. Кутепов, О. В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2018. Вып. 7. — С.117–131.
4. Влияние режимов термической обработки на стойкость высокопрочной арматурной стали к водородному растрескиванию / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2017. — Т.7. — №4 (25). — С.6–20.
5. ГОСТ 10884-94. Сталь арматурная термомеханически упрочненная для железобетонных конструкций. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2009. — 29 с.
6. Физико-механические и коррозионные свойства металлических материалов, эксплуатируемых в агрессивных средах: монография / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, М. В. Ушаков, В. В. Извольский. — М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. — 556 с.
7. Дорофеев Г. А., Зинягин Г. А., Макаров А. Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления: монография. — Старый Оскол: ГНТ, 2021. — 324 с.
8. Моделирование процессов ресурсосберегающей обработки слитковых, порошковых, наноструктурных и композиционных материалов: монография / М. Х. Шоршоров, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева, Е. М. Селедкин, Д. С. Клементьев, А. А. Калинин. изд. 2-е, испр. и доп. — М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. — 360 с.
9. Влияние термической обработки на механические свойства арматурного проката / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, А. Н. Чуканов, Е. В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2021. — Т.11. — №2. — С.8–25.
10. Влияние режимов высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства арматурного проката / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. — 2019. — Т.23. — №2. — С.29–52.
11. О состоянии предпревращения металлов и сплавов: монография / О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев, И. В. Тихонова, Н. Н. Сергеев, А. Д. Бреки, Н. Е. Стариков, А. Н. Сергеев, А. А. Калинин, Д. В. Малий, Ю. Е. Титова, С. Е. Александров, Н. А. Крылов. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. — 245 с.
12. Влияние разнотемпературности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А. Е. Гвоздев, А. Г. Колмаков, Д. А. Провоторов, И. В. Минаев, Н. Н. Сергеев, И. В. Тихонова // Металловедение. — 2014. — №7. — С. 23–26.

13. Temperature field calculation at incomplete hot processing of metal alloys / G.M. Zhuravlev, D.N. Romanenko, A.E. Gvozdev, S.N. Kutepov, O.M. Gubanov // *Steel in Translation*. — 2019. — Т.49. — №10. — С.716–719.
14. Selecting Laser Cutting Modes for Engineering Steel Sheets Aiming at Provision of the Required Properties of Surface Quality / N.N. Sergeev, I.V. Minaev, I.V. Tikhonova, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, A.N. Sergeev, S.N. Kutepov, D.V. Malii // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2020. — Vol.11. — №4. — С.815–822.
15. Influence of Heat Treatment on Residual Stress Formation in the Wear-Resistant Steel 60–Steel 15–Steel 60 Bimetal Material / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, S.N. Kutepov, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, D.S. Klemen-tev // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2021. — Vol.12. — №1. — P.5–9.
16. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeev, D.M. Khonelidze, D.V. Malii, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2017. — Т.8. — №1. — С. 148–152.

REFERENCES

1. Kugushin A. A., Uzov I. G., Kalmykov V. V., Madatyan S. A., Ivchenko I. V. 1986, *High-strength reinforcing steel*. M.: Metallurgy. 272 p.
2. Knots G. I. 1985, «Thermal hardening of rolled products – an effective way to save metal», *Metallurgy and heat treatment of metals*, No.8. pp. 18–21.
3. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Kutepov S. N., Pantyukhin O. V. 2018, «Investigation of the effect of alloying on the mechanical and corrosion properties of rebar rolled products», *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, Issue 7. pp. 117–131.
4. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. 2017 «The influence of heat treatment modes on the resistance of high-strength reinforcing steel to hydrogen cracking», *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Equipment and technologies*, Т.7. №4 (25). pp. 6–20.
5. GOST 10884-94. 2009, *Thermomechanical reinforced reinforcing steel for reinforced concrete structures. Technical conditions*. Moscow: Standartin-form. 29 p.
6. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ushakov M. V., Izvolsky V. V. 2020, *Physico-mechanical and corrosion properties of metal materials operated in aggressive environments: monograph*. M.-Vologda: Infra-Engineering. 556 p.
7. Dorofeev G. A., Zinyagin G. A., Makarov A. N. 2021, *Production of steel based on direct reduction iron*. Stary Oskol: TNT. 324 p.
8. Shorshorov M. H., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Ku-zovleva O. V., Seledkin E. M., Klementyev D. S., Kalinin A. A. 2021, *Modeling of processes of resource-saving processing of ingot, powder, nanostructured and composite materials*. Ed. 2 nd, ispr. and additional. M.-Vologda: Infra-Engineering. 360 p.
9. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Ageeva E. V. 2021, «The influence of heat treatment on the mechanical properties of rolled steel», *Proceedings of the Southwestern State University. Series: Equipment and technologies*, V.11. No.2. pp. 8–25.

10. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. 2019, «The influence of the modes of high-temperature thermomechanical treatment on the mechanical properties of reinforcing bars», *Proceedings of the southwest state University*, Vol. 23. No. 2 pp. 29–52.
11. Kuzovleva O. V., Gvozdev A. E., Tikhonova I. V., Sergeev N. N., Breki A.D., Starikov N. E., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Maliy D. V., Titova Yu. E., Alexandrov S. E., Krylov N. A. 2016, *On the state of pre-conversion of metals and alloys: monograph*. Tula: TulSU Publishing House. 245 p.
12. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., Minaev I. V., Sergeyev N. N., Tikhonova I. V. 2014, «The influence of austenite grain diversity on the kinetics of perlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels», *Materials Science*, No.7. pp. 23–26.
13. Zhuravlev G. M., Romanenko D. N., Gvozdev A. E., Kutepov S. N., Gubanov O. M. 2019, «Calculation of the temperature field during incomplete hot processing of metal alloys», *Steel in translation*, V.49. No.10. pp. 716–719.
14. Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Maliy D. V. 2020, «The choice of modes of laser cutting sheet structural steel to ensure the desired properties of surface quality», *Inorganic materials: applied research*, Vol.11. No.4. pp. 815–822.
15. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Klementyev D. S. 2021, «The influence of heat treatment on the formation of residual stresses in a wear-resistant bimetallic material Steel 60-Steel 15-Steel 60», *Inorganic materials: applied research*, Vol.12. No.1. pp. 5–9.
16. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Sergeev A. N., Honelidze D. M., Maliy D. V., Golyshev I. V., Kolmakov A. G., Provotorov D. A. 2017, «Distribution and structure of temperature in the zone of thermal impact for steel sheets after laser cutting», *Inorganic materials: applied research*, Vol.8. No.1. pp. 148–152.

Получено 03.09.2021 г.

Принято в печать 21.12.2021 г.