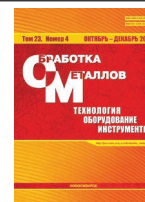




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства

Роман Соколов^{a,*}, Виталий Новиков^b, Камилль Муратов^c, Анатолий Венедиктов^d

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, д. 38, г. Тюмень, 625000, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>, falcon.rs@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1987-351X>, vitaly.nowikov2017@yandex.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>, muratows@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6899-4297>, annattoliy@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.24

История статьи:

Поступила: 01 июня 2021

Рецензирование: 06 августа 2021

Принята к печати: 23 сентября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

РЭМ

Температура отпуска

Фактор разнородности

Коррелятивная сила

Внутренние напряжения

Размер зерна

Предел прочности

АННОТАЦИЯ

Введение. Контроль механических свойств конструкционных сталей является одним из основных процессов, регламентирующих срок эксплуатации оборудования. В большинстве технических процессов (обработка давлением, сварка, прокатка, термическое воздействие) происходит изменение ее структуры как в локальных областях, так и во всем объеме. Изменение структуры влечет за собой изменение свойств стали, в результате которых в локальных областях на различных этапах эксплуатации увеличивается вероятность возникновения и развития критических дефектов. Их наличие существенным образом сказывается на эксплуатационных характеристиках оборудования и приводят к преждевременному старению материала и выводу его из строя. Именно потому, что контроль механических свойств стали остается одной из актуальных проблем, разрабатываются новые методы контроля. Известно, что все свойства стали зависят от структуры вещества, однако работы по изучению влияния дисперсности рассматриваемой структуры на механические свойства представлены в незначительном объеме. **Цель работы:** проанализировать с математической точки зрения влияние фактора разнородности как параметра, отражающего дисперсности системы, на механические свойства конструкционной стали. **В работе исследованы** термообработанные образцы стали 15ХСНД, 09Г2С и Ст3, изготовленные из листового проката.

Методы исследования. Для исследования сталей 15ХСНД, 09Г2С и Ст3 в работе применялись: растровый электронный и оптический микроскопы – для изучения зеренной структуры и межзеренных границ; программный пакет SIAMS 700 – для нахождения границ и среднестатистических данных зеренной структуры; портативный рентгенофлуоресцентный анализатор металлов и сплавов X-MET 7000 – для определения химического состава исследуемых образцов в процентном отношении; разрывная машина ИР-50 – для измерения предела прочности образцов; твердомер по Виккерсу – для определения твердости образцов. **Результаты и обсуждения.** Обнаружено, что для механических свойств конструкционных сталей (твердости и предела прочности), величины внутренних напряжений и фактора разнородности наблюдается удовлетворительная корреляция, которая может быть использована для предсказания опасных состояний конструкций и времени их эксплуатации. Проведен дисперсионный и регрессионный анализ обнаруженных зависимостей. Замечено, что выпадение некоторых значений из общей регрессионной зависимости, скорее всего, может быть связано с уменьшением величины внутренних напряжений в результате уменьшения искажений кристаллической решетки стали, происходящих при термической обработке. Стоит отметить, что происходящие процессы и степень их влияния на свойства рассматриваемых конструкционных сталей могут быть различными из-за наличия в составе исследованных сталей разного количества легирующих элементов.

Для цитирования: Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства / Р.А. Соколов, В.Ф. Новиков, К.Р. Муратов, А.Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 93–110. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110.

Введение

Достаточно часто в практике эксплуатации опасных производственных объектов возникает потребность в определении величины механических свойств стали для прогноза остаточного ресурса. Механические свойства являются одними из основных характеристик, к которым должны быть предъявлены жесткие требования

*Адрес для переписки

Соколов Роман Александрович, аспирант, ассистент
Тюменский индустриальный университет
ул. Володарского, 38,
625000, г. Тюмень, Россия
Тел.: 8 (919) 925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru

контроля, так как они напрямую определяют срок эксплуатации оборудования и металлоконструкций.

Как известно, в большей степени свойства сплавов в твердом состоянии определяются: их кристаллической структурой, химическим составом и наличием нарушений строения структуры всех видов, проявляющихся в виде неоднородностей [1]. Наличие неоднородностей структуры или химического состава приводит к отклонению заложенных в материале свойств в локальной области. Это существенно сказывается на надежности и сроке эксплуатации оборудования.

Так как эксплуатация оборудования и конструкций, изготовленных из конструкционных сталей, происходит в большинстве случаев при постоянных внешних нагрузках, которые имеют многосоставную природу, то происходит быстрая интенсификация процессов разрушения материала, приводящая к возникновению аварийных ситуаций.

В связи с высокой потребностью в способах и методах определения механических свойств сталей проводится достаточно много исследований в данном направлении [2–6]. Например, кроме разрушающих испытаний на сегодняшний день известны методы неразрушающего контроля, основанные на анализе магнитных параметров и позволяющие определить механические характеристики стали [7, 8]. В работе [7] в качестве диагностического критерия величины твердости и предела прочности предложено использовать коэрцитивную силу стали. Однако такой подход имеет свои нюансы, а именно в обнаруженных закономерностях [7] наблюдается отсутствие единой зависимости механических свойств и коэрцитивной силы для различных марок стали, что указывает на различие в структуре и свойствах фазовых составляющих, которые существенным образом влияют на формирование механических свойств и коэрцитивной силы. Кроме того, имеются методы контроля механических свойств, которые основаны на анализе распространения ультразвуковых колебаний через объект контроля [9].

Связь диагностических критериев, по которым можно судить о величине механических свойств стали и особенностях структуры стали, рассматривается уже долгое время.

Известны работы, в которых учитывают влияние дисперсности структуры (неоднородности), т. е. наличие одновременно в структуре различных по величине зерен, на механические свойства. Так, например, в работе [10] рассматривается влияние ультрамелкозернистой или мелкозернистой структуры простой углеродистой стали на предел текучести. В работе [11] со статистической точки зрения для эвтектоидной стали с ультрамелкозернистой или мелкозернистой структурой анализировался процесс накопления и появления дислокаций и его влияние на прочность стали. Изменение пластической деформации для аустенитной стали с высоким содержанием марганца и различным средним размером зерна отражено в работе [12]. В работе [13] была проведена оценка влияния развития субструктуры на поведение деформационного упрочнения стали Fe – 17,5Mn–8,3Al–0,74C–0,14Si. Было отмечено, что субструктуры при измельчении вносят существенные изменения в прочностные свойства.

Внутризеренная неоднородность ориентации и напряженного состояния выделены как важные области для будущих исследований в работе [14].

Кроме работ, в которых исследования проводились на сплавах, полученных обычными металлургическими способами, имеются работы [15, 16], в которых исследуемые образцы были получены аддитивным способом. В таких работах рассматривалось влияние микроструктурных особенностей, а именно дескрипторов мезоструктуры, которые описывают особенности мезоструктурной неоднородности на механические свойства с точки зрения количественной оценки.

Несмотря на то что в перечисленных выше работах проведен некоторый статистический анализ влияния структурной неоднородности на механические свойства, в них отсутствует проверка выдвинутых в качестве результатов зависимостей.

В данной работе рассматривается влияние, оказываемое дисперсностью структуры не только на значение предела прочности, но и на величину коэрцитивной силы и внутренних напряжений конструкционных сталей 15ХСНД, 09Г2С, Ст3. Оценка влияния производится на основе анализа корреляционных зависимостей между

пределом прочности, коэрцитивной силой, величиной внутренних напряжений и фактором разнотерности, выступающим в качестве критерия дисперсности структуры.

Исследуемые конструкционные стали имеют широкое применение для изготовления различных металлоконструкций, трубопроводного транспорта, резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

Для определения наличия взаимосвязи между рассматриваемыми величинами необходимо: проанализировать влияние термообработки на величину коэрцитивной силы, предела прочности, внутренних напряжений, фактора разнотерности; определить наличие корреляционной зависимости между данными параметрами; объяснить изменения, происходящие с ними при термообработке.

Методика исследований

Образцы из сталей 09Г2С, Ст3, 15ХСНД размером 4,0×70,0×25,0 мм были вырезаны лазером из листов вдоль направления их прокатки. Данные о химическом составе определены анализатором X-MET 7000. В табл. 1 приведены усредненные значения, полученные при проведении 10 измерений.

Как известно, термическая обработка сильно сказывается на структурно-фазовом составе стали, а так как неоднородности в механических и магнитных свойствах стального проката, из которого изготовлены образцы, обычно не пре-

вышают 15 % [17], то для создания различных вариаций структуры, а следовательно, и зеренного состава необходимо провести термообработку экспериментальных образцов. Поэтому перед проведением исследований образцы подвергались закалке с последующим отпуском при различных температурах (табл. 2). Это было сделано для создания различных вариаций структурно-фазового состояния.

Микроструктура исследуемых образцов была изучена при помощи растрового электронного микроскопа JEOL 6008A. В качестве травителя использовался 3 %-й раствор азотной кислоты.

Определение величины фактора разнотерности производилось по формулам, представленным в работах [18, 19], где используется распределение баллов зерен наблюдаемых на микрошлифе.

Для расчета фактора разнотерности выполнялась обработка микрофотографий (рис. 1) в программном комплексе металлографических исследований «SIAMS 700» (рис. 2). В качестве примера на рис. 3 показано распределение балла зерен образца стали 15ХСНД. Аналогичный характер имеют распределения остальных образцов.

Балл зерна определялся в соответствии с ГОСТ 5639–82 [21]. Расчет фактора разнотерности F_z производился по формуле

$$F_z = \frac{f_{\max} Z_{\max}}{\sum f_i Z_i}, \quad (1)$$

Таблица 1

Table 1

Химический состав исследуемых сталей
Chemical composition of the studied steels

Марка стали/ Steel grade	Содержание элемента, % масс / Element content, % wt							
	C	Si	P*	S*	Cr	Mn	Ni	Cu
09Г2С/ 09G2S	0,11	0,15	0,05	<0,028	0,07	1,91	0,11	0,22
Ст3/ St3	0,16	0,15	0,05	<0,02	0,03	0,45	0,03	0,04
15ХСНД/ 15KhSND	0,16	0,71	0,06	<0,02	0,84	0,79	0,34	0,20

* Показатели содержания углерода, серы и фосфора приведены согласно информации, указанной в сертификатах качества на стали, из которых изготовлены образцы / The indicators of the content of carbon, sulfur and phosphorus are given according to the information specified in the quality certificates on the steel from which the samples are made.

Термическая обработка исследуемых образцов
Heat treatment of the test samples

Марка стали/ Steel grade	Термическая обработка / Heat treatment
09Г2С/ 09G2S	Нагрев до 930±20 °С, закалка в воде Отпуск при 200, 350, 500, 650 °С в течение 1 часа, охлаждение на воздухе / Heating up to 930 ± 20 °С quenching in water Tempering at 200, 350, 500, 650 °С for 1 hour, air cooling
Ст3/ St3	Нагрев до 930±20 °С, закалка в воде Отпуск при 200, 350, 500, 650 °С в течение 1 часа, охлаждение на воздухе / Heating up to 930 ± 20 °С quenching in water Tempering at 200, 350, 500, 650 °С for 1 hour, air cooling
15ХСНД/ 15KhSND	Нагрев до 930±20 °С, закалка в воде Отпуск при 200, 300, 350, 400, 500, 550, 650 °С в течение 1 часа, охлаждение на воздухе / Heating up to 930 ± 20 °С quenching in water Tempering at 200, 300, 350, 400, 500, 550, 650 °С for 1 hour, air cooling

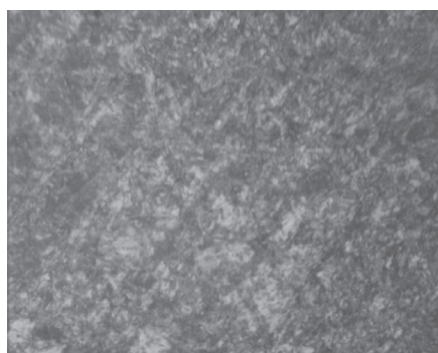
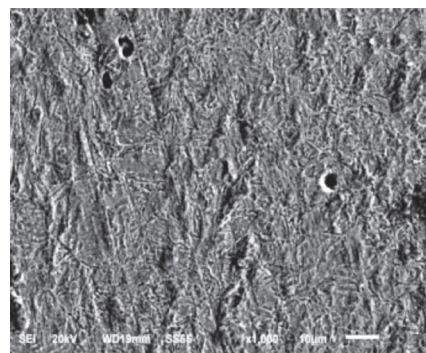
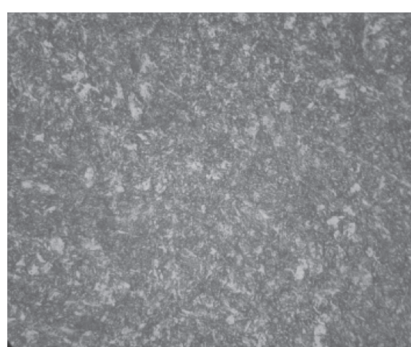
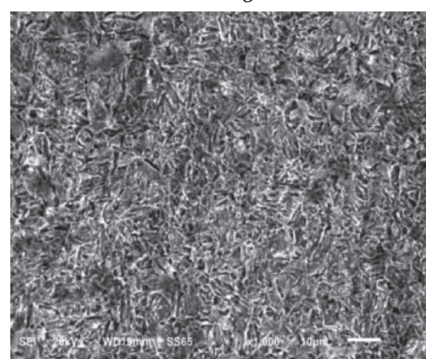

a

б

в

г

Рис. 1. Структура термообработанных образцов стали 09Г2С при 1000-кратном увеличении в оптическом и растровом электронном микроскопах:

a – структура закаленного при температуре 950 °С образца в оптическом микроскопе; *б* – структура закаленного при температуре 950 °С образца в растровом электронном микроскопе; *в* – структура образца при отпуске 350 °С в оптическом микроскопе; *г* – структура образца при отпуске 350 °С в растровом электронном микроскопе

Fig. 1. Structure of heat-treated steel samples 09G2S at 1,000x magnification in optical and scanning electron microscopes:

a – the structure of the sample quenched at a temperature of 950 °С, studied using an optical microscope; *б* – the structure of the sample quenched at a temperature of 950 °С, studied using a scanning electron microscope; *в* – the structure of the sample after tempering at 350 °С, studied using an optical microscope; *г* – the structure of the sample after tempering at 350 °С, studied using a scanning electron microscope

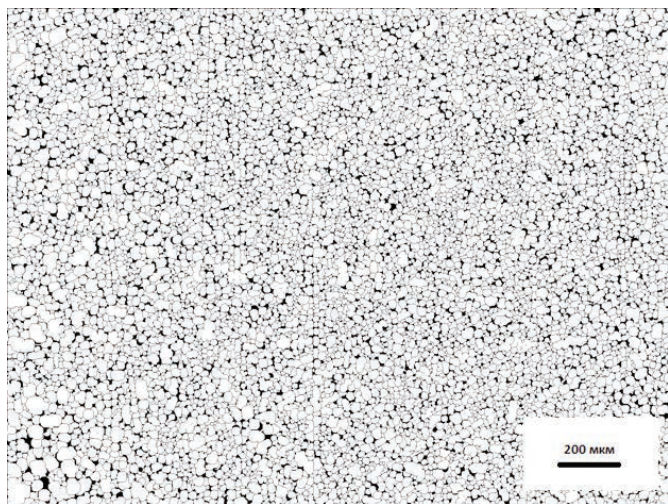


Рис. 2. Микроструктура нагретого до 930 °C и закаленного в воде образца, изготовленного из проката стали 09Г2С, полученная при обработке микрофотографий в программном комплексе SIAMS 700

Fig. 2. Microstructure of a sample heated to 930 °C and quenched in water, made of rolled steel 09G2C, obtained by processing microphotographs in the SIAMS 700 software package

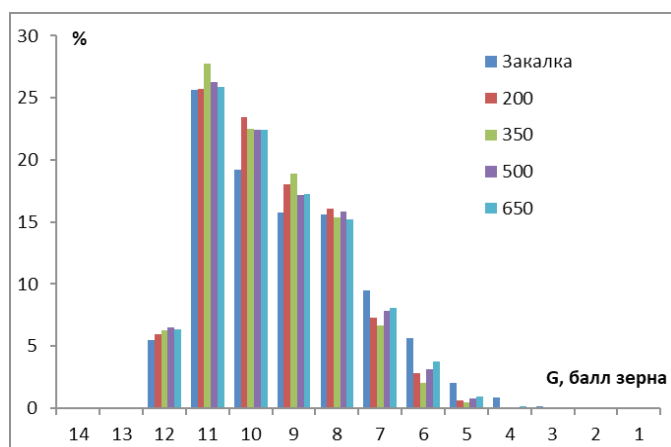


Рис. 3. Гистограмма процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали 15XCHD по размеру зерна [20]

Fig. 3. Histogram of the percentage distribution of grains by points for micro-sections of heat-treated samples made of 15KhSND steel by grain size [20]

где f_i – доля зерен с определенным баллом, %; f_{\max} – доля зерен, занимающих максимальную площадь на шлифе, %; Z_i – балл зерна; Z_{\max} – балл зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе.

Результаты и их обсуждение

Значения величины фактора разноразмерности, полученные в работе [20], представлены на рис. 4. Можно заметить, что наибольшее значение в величине фактора разноразмерности наблюдается у образца с температурой отпуска 200 °C, что, скорее всего, связано с начавшимся процессом нарушения когерентности решетки мартенсита и цементита [22–24] в результате начала процессов выделения углерода [24, 25]. При течении данных процессов в материале образуется область с обедненной углеродом фазой, которая обладает низкой твердостью, а также новая фаза в виде феррита и цементита. Происходит дробление фазы мартенсита, что приводит к росту числа зерен с более высоким баллом.

Величина внутренних напряжений определялась согласно методике [26] путем сравнения полученных на исследуемых образцах данных с данными эталонного образца, в качестве которого использовали отожженный образец. Полученные результаты представлены на рис. 5 [25]. Для снятия рентгеновских дифрактограмм использовался автоматический рентгеновский дифрактометр общего назначения ДРОН-7.

При помощи разрывной машины ИР-50 были получены диаграммы напряжения–деформация. При анализе уточнялись данные о величине временного сопротивления исследуемых материалов, подвергаемых различной термической обработке (рис. 6).

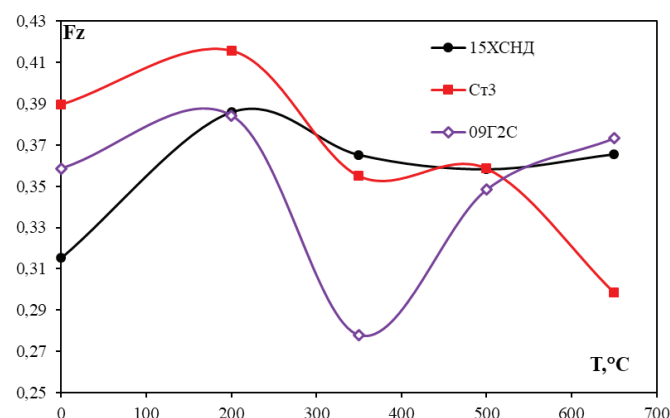


Рис. 4. Изменение величины фактора разноразмерности F_z для образцов из стали 15XCHD при различной термообработке [20]

Fig. 4. Change in the value of the factor of different grain size F_z for samples made of 15KhSND steel with different heat treatment [20]

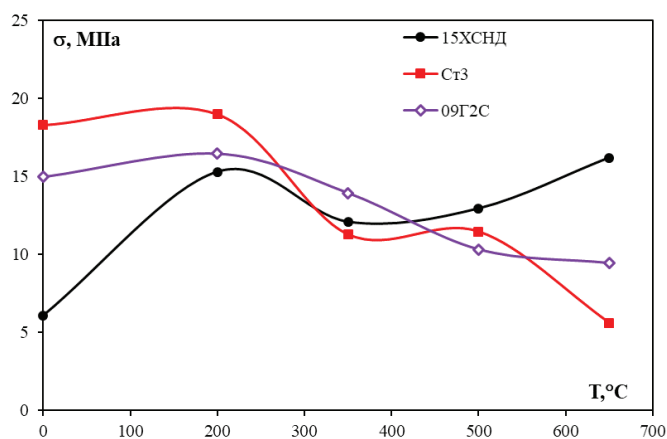


Рис. 5. Зависимость изменения величины внутренних напряжений от температуры отпуска конструкционных сталей

Fig. 5. Dependence of the change in the magnitude of internal stresses on the tempering temperature of structural steels

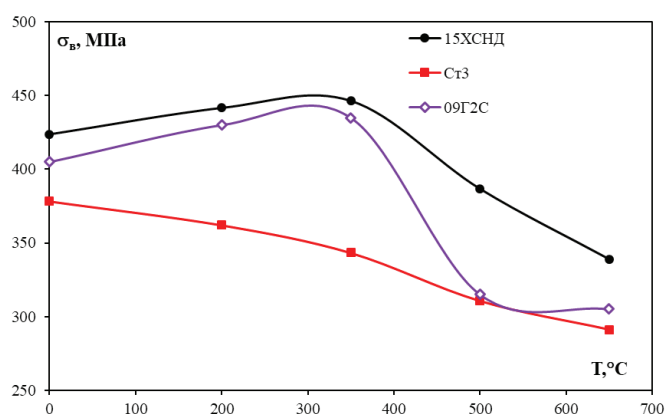


Рис. 6. Зависимость изменения величины предела прочности от температуры отпуска конструкционных сталей

Fig. 6. Dependence of the change in the value of the ultimate strength on the tempering temperature of structural steels

Структуроскопом КРМ-Ц-К2М была определена величина коэрцитивной силы (рис. 7), которая монотонно убывает с увеличением температуры отпуска. Это связано с изменениями, происходящими в структурно-фазовом составе сталей. В работе [27] отмечается, что изменения коэрцитивной силы связаны с процессами распада мартенситной структуры и нахождением цементитных составляющих в различных магнитных состояниях.

Известны работы [28, 29], в которых для определения структурных изменений использо-

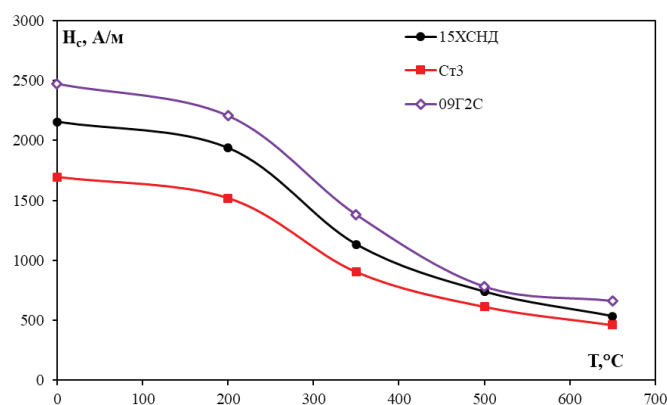


Рис. 7. Зависимость коэрцитивной силы от температуры отпуска исследуемых сталей

Fig. 7. Dependence of the coercive force on the tempering temperature of the steels being studied

вались магнитные параметры стали: коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, релаксационная коэрцитивная сила, дифференциальная магнитная проницаемость и др.

Наличие установленной экспериментально корреляционной зависимости между магнитными свойствами ферромагнетика, структурой и механическими свойствами можно проследить в работе [30]. Однако стоит отметить, что подобного рода закономерности определяются только для определенного класса сталей, например углеродистых сталей 30, 35, 45, У8, У10, У12, подвергнутых закалке и отпуску при разных температурах [31]. В работе [29] показано значительное влияние термической обработки на структуру и свойства стали, которое можно рассмотреть на примере коэрцитивной силы и твердости.

При анализе взаимосвязи корреляционных зависимостей магнитных и механических свойств для сталей, относящихся к различным группам, зависимости перестают носить общий прямой характер, и зачастую определение интересующих свойств производить затруднительно. Это связано с тем, что формируемые при термической обработке структуры и их характеристики (например, количество, распределение и свойства мартенсита, остаточного аустенита, карбидов и т. д.) в большей степени зависят от взаимодействия легирующих элементов, которые входят в состав стали, их процентного содержания, включая углерод, а также характера и величины температурных воздействий [32].

Для понимания влияния дисперсности структуры на магнитные и механические свойства стали необходимо произвести оценку методом статистического и регрессионного анализа. На рис. 8–10 представлены полученные в лабораторных условиях зависимости фактора разнотерности от различных параметров, характеризующих свойства стали. Кроме того, на графиках приведены предсказанные значения для Y -величины фактора разнотерности, рассчитанного по величине внутренних напряжений.

Проведенный регрессионный анализ для представленных на рис. 8 [33, 34] данных позволил получить информацию о регрессионной статистике, основные показатели которой приведены в табл. 3.

R -квадрат, или коэффициент детерминации, в анализируемой модели равен 0,885, что говорит о том, что используемые для проведения анализа параметры имеют зависимость, которая с вероятностью 88,5 % может быть объяснена при использовании предложенной модели. Так как коэффициент детерминации больше 0,5, то обнаруженная зависимость считается удовлетворительной.

ε – стандартная ошибка регрессионной модели. Данная величина показывает, насколько предсказания значений переменной Y не соответствуют истинному значению. Обычно допу-

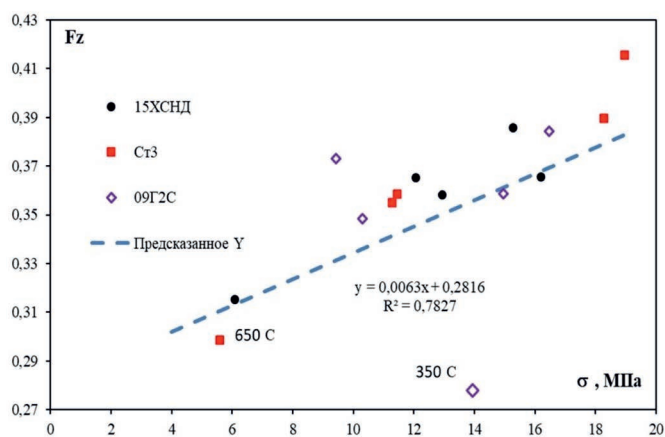


Рис. 8. Величина фактора разнотерности F_z в зависимости от величины внутренних напряжений (напряжений второго рода) для термообработанных образцов, изготовленных из конструкционных сталей

Fig. 8. The value of the grain size factor F_z depending on the value of internal stresses (stresses of the second kind) for heat-treated samples made of structural steels

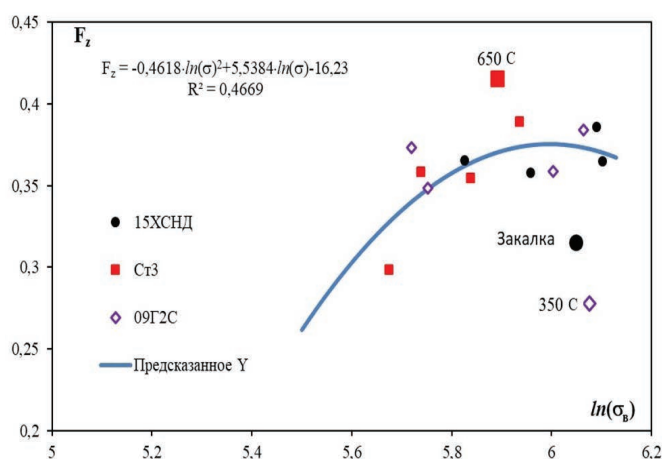


Рис. 9. Величина фактора разнотерности F_z в зависимости от логарифма величины предела прочности для термообработанных образцов, изготовленных из конструкционных сталей

Fig. 9. The value of the factor of different grain size F_z depending on the logarithm of the ultimate strength value for heat-treated specimens made of structural steels

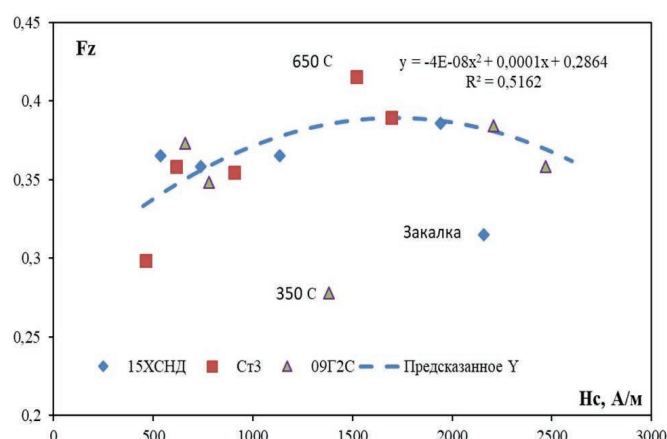


Рис. 10. Величина фактора разнотерности F_z в зависимости от величины коэрцитивной силы для термообработанных образцов, изготовленных из конструкционных сталей

Fig. 10. The value of the factor of different grain size F_z depending on the value of the coercive force for heat-treated specimens made of structural steels

стимые границы, определенные на основе ε , лежат в пределах $\pm 2 \dots 3$ значений.

В таком случае уравнение, характеризующее линейную регрессионную модель, примет вид

$$Y = aX + \beta \pm \varepsilon. \quad (2)$$

В рассматриваемом случае $\varepsilon = 0,014$ показывает, насколько велика ошибка предсказания одной величины от другой. Исходя из величины ε ука-

Таблица 3

Table 3

Регрессионная статистика

Regression statistics

Множественный R Multiple R	0,885
R -квадрат R -square	0,783
Нормированный R -квадрат Normalized R -square	0,765
Стандартная ошибка Standard error	0,014
Наблюдения Observations	14

жем на диаграмме границы предсказания, которые определяются как

$$G = \hat{Y}_i \pm 2\epsilon, \quad (3)$$

где \hat{Y}_i – предсказанная величина Y .

При величине $\pm 2\epsilon$ 95 % точек данных должны располагаться в пределах этих определенных границ.

Адекватность предложенной линейной регрессионной модели можно проверить с помощью исследования остатков модели, которые определяются для каждого X как

$$U_i = Y_i - \hat{Y}_i. \quad (4)$$

График зависимости остатков от предсказанных значений Y представлен на рис. 11. Для по-

добных графиков необходимым условием, которое характеризует адекватности анализируемой зависимости, является отсутствие характерных «паттернов» (шаблонов) неравномерного распределения в зависимости от значений Y . Для зависимости, предоставленной на рис. 11, в расположении облака точек не наблюдается явных шаблонов, что может говорить нам о правильности найденной линейной регрессии.

В табл. 4 приведены величины, необходимые для проведения регрессионного анализа. Коэффициент Y_{Π} соответствует значению Y при условии, что все переменные в рассматриваемой модели равны 0. Это означает, что в модели не

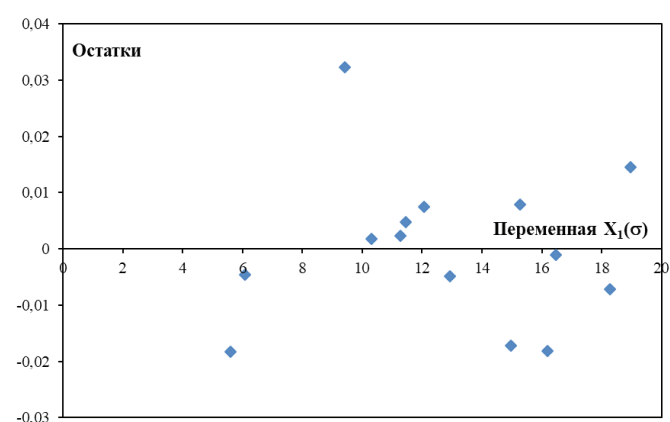


Рис. 11. Зависимость остатков для величины внутренних напряжений, полученной для сталей различных марок от твердости при различной термообработке образцов

Fig. 11. Dependence of the residuals for the magnitude of the internal stresses obtained for steels of different grades on the hardness at different heat treatment of samples

Таблица 4

Table 4

Данные, полученные при регрессионном анализе

Data obtained from regression analysis

Параметры	Коэффициенты / Coefficients	Стандартная ошибка / Standard error	t -статистика/ t -statistics	P -Значение/ P -value
Y_{Π}	0,282	0,013	21,908	4,8E-11
$X_{\Pi\Pi}$	0,006	0,001	6,574	2,64E-05
Нижние 95 % / Low 95%			Верхние 95 % / High 95 %	
Y -пересечение / Y -intersection	0,254		0,309	
Переменная X 1 / Variable X 1	0,004		0,008	

учитываются влияния, оказываемые другими факторами на анализируемые параметры. $X_{\text{П}}$ – показывает весомость переменной X над Y , т. е. внутренние напряжения в пределах данной модели влияют на фактор разнотерности с весом 0,0063. Знак перед числом указывает на влияние, оказываемое на фактор разнотерности: чем больше внутреннее напряжение, тем больше величина фактора разнотерности.

Кроме того, представлены величины для переменной Y при пересечении оси X при доверительном интервале 0,95.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа полученных данных [35–37] представлен в табл. 5, где SS – это сумма квадратов отклонений; df – степень свободы; графа MS – средний квадрат; F – критерий фактического F -распределения.

Таблица 5

Table 5

Результаты однофакторного дисперсионного анализа
Results of one-way analysis of variance

Дисперсионный анализ / ANOVA					
Результаты анализа / Analysis results	df	SS	MS	F	Значимость F / Significance of F
Регрессия / Regression	1	0,009	0,009	43,214	2,64E-05

На основе сравнения дисперсии, обусловленной межгрупповым разбросом, и дисперсии, обусловленной внутригрупповым разбросом, была проведена проверка статистической значимости. Полученные внутригрупповые дисперсии сравнивались с помощью F -критерия, который определяет, статистически значимо ли различие между средними значениями и действительно ли отношение дисперсий больше единицы. Значимость F показывает наличие разницы между средними величинами. Так как эта величина незначительна, то был сделан вывод, что нулевая гипотеза о наличии корреляционной зависимости между фактором разнотерности и поверхностной твердостью стали имеет место.

При помощи дисперсионного анализа также была произведена проверка гипотезы о наличии влияния рассматриваемых параметров друг на друга. Для этого было проанализировано несколько выборок значений фактора разнотерности, полученных для образцов с различной термической обработкой. Выборки содержали равное число элементов.

На рис. 12 приведены статистические характеристики исследуемого набора данных. Выборки 1 и 2 представляют собой набор значений фактора разнотерности, полученный при нескольких обработках снимков микроструктуры для различных значений предела прочности.

Выборка 3, в отличие от 1 и 2, получена при определении балла зерна по его площади.

Из блочной диаграммы видно, что выбор метода расчета фактора разнотерности не оказывает существенного влияния на наличие взаимосвязи между данной величиной и величиной внутренних напряжений. Однако различие в средних значениях выборок может быть обусловлено лишь случайностью, поэтому статистически обоснованный вывод о наличии однозначного влияния рассматриваемых факторов друг на друга не может быть сделан.

Величина дисперсии (разброс данных) для рассматриваемых выборок имеет приблизительно одинаковое значение, что является одним из основных условий, определяющих корректность применения метода дисперсионного анализа.

Анализ тестовой статистики, которая в рассматриваемом случае имеет вид F -распределения, или распределения Фишера, представлена на рис. 13.

Полученное для анализируемой зависимости среднее значение F -распределения, которое характеризуется 13 и 28 степенями свободы, равно 1,08. Критерием отклонения или принятия нулевой гипотезы в таком случае выступает значение F_0 , которое равно 4,915. Вероятность p , что случайная величина, имеющая распределение Фишера для анализируемой зависимости, примет значение 5,3358 или более, составляет 0,00034.

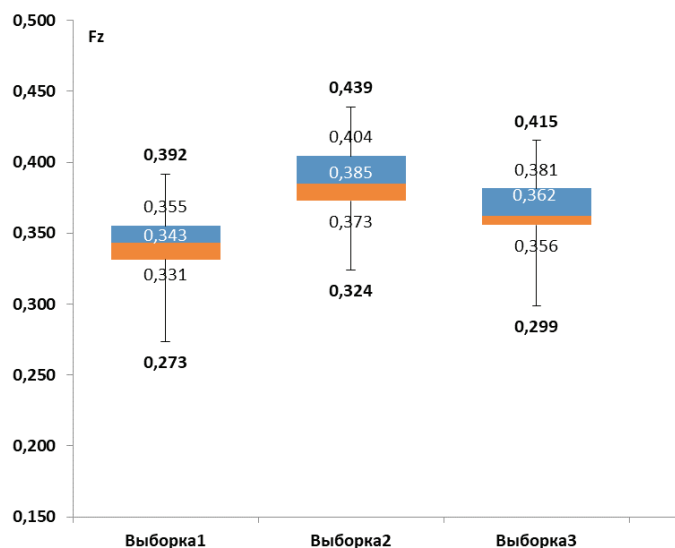


Рис. 12. Блочная диаграмма, полученная при анализе выборок величины фактора разнорзерности, полученных при различной оценке величины зерна

Fig. 12. A block diagram obtained by analyzing samples of the value of the grain size factor obtained with different estimates of the grain size

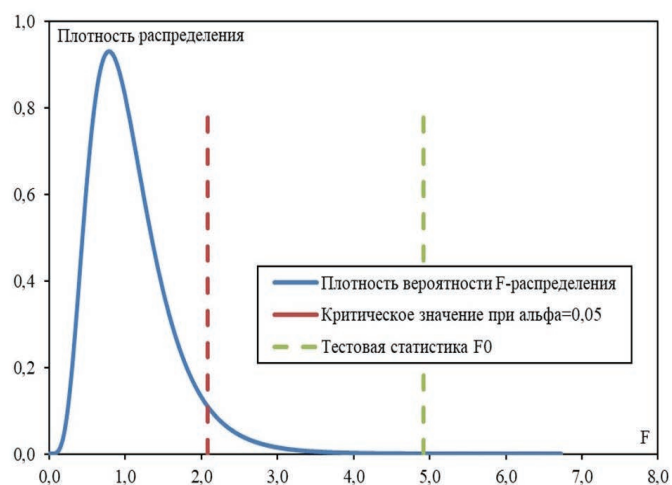


Рис. 13. Тестовая статистика, полученная на основе анализа рассматриваемых выборок

Fig. 13. Test statistics obtained from the analysis of the samples under consideration

При сравнении с уровнем значимости 0,05 видно, что p значительно меньше его, что говорит о том, что нулевая гипотеза отклонена, и различие средних значений по анализируемым выборкам не может быть объяснено лишь случайностью. Таким образом, можно сделать вывод, что средние значения по выборкам статистически значимо отличаются друг от друга, и рассматриваемая

модель (зависимость) является статистически обоснованной.

Для зависимостей, представленных на рис. 8 и 9, был проведен анализ, описанный выше.

На рис. 14 и 15 представлены распределения Фишера, полученные при анализе зависимостей $\ln(\sigma)$ и H_c .

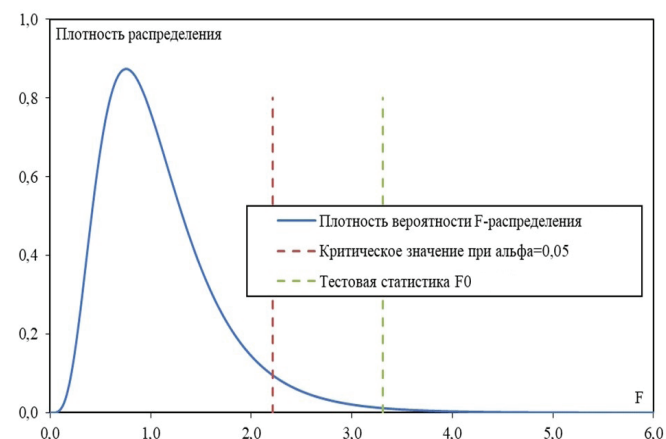


Рис. 14. Тестовая статистика, полученная на основе анализа рассматриваемых выборок, полученных для $\ln(\sigma)$

Fig. 14. Test statistics obtained from the analysis of the considered samples obtained for $\ln(\sigma)$

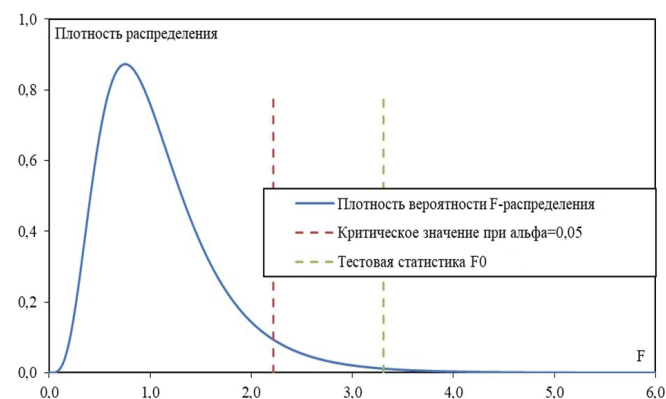


Рис. 15. Тестовая статистика, полученная на основе анализа рассматриваемых выборок, полученных для H_c

Fig. 15. Test statistics obtained from the analysis of the considered samples obtained for H_c

При анализе критериев для данных зависимостей, так же как и в предыдущем случае, средние значения по выборкам статистически значимо отличаются друг от друга, и рассматриваемая модель (зависимость) является статистически обоснованной.

Представленные на рис. 8...10 зависимости с высокой долей вероятности могут быть описаны с помощью линейной (в случае внутренних напряжений) и полиномиальной кривой. Наличие таких зависимостей говорит о том, что в механизме формирования как предела прочности внутренних напряжений, так и коэрцитивной силы рассматриваемых сталей значительную роль играет дисперсность системы (фактор разнотерности). Наблюдаемые выпадения точек из обнаруженных для исследуемых сталей зависимостей происходят для образцов с различной термической обработкой, что в большей степени обусловлено резкими изменениями в структурно-фазовом составе сталей. Следует отметить, что выпадение точек из обнаруженных зависимостей происходит при одних и тех же температурах: для образцов из стали 15ХСНД – образец с закалкой в воде; для образцов из стали Ст3 – образец с отпуском при 650 °С; для образцов из стали 09Г2С – образец с отпуском при 350 °С, что может свидетельствовать о наличии влияния дисперсности структуры на рассматриваемые свойства.

Как отмечалось выше, наблюдаемые выпадения экспериментальных значений из обнаруженных регрессионных зависимостей могут быть объяснены с позиции влияния других параметров структуры и фазы на рассматриваемые величины.

Изучение микроструктуры исследуемых образцов и анализ информации о величинах внутренних напряжений позволили в какой-то степени объяснить наблюдаемые явления. Выпадение закаленного образца, изготовленного из стали 15ХСНД, видимо, связано с формированием такого состояния структуры, в котором не наблюдается появления эффекта нарушения когерентности решеток мартенсита и цементита [23, 38–41]. Находясь в таком состоянии, обе фазы имеют низкую плотность дефектов строения кристаллической решетки [39, 42–45], что влияет на величину внутренних напряжений и делает ее достаточно низкой по сравнению с внутренними напряжениями, наблюдаемыми при подобной термической обработке для сталей 09Г2С и Ст3.

Выпадение значений анализируемых параметров для образца, изготовленного из стали 09Г2С, отпущенного при температуре 350 °С,

может быть объяснено процессами разупрочнения стали, возникающими из-за снижения плотности дислокаций и различных дефектов строения, скапливающихся на карбидных включениях, в качестве которых выступает соединение марганца с углеродом [23, 43–47], и приводящих к уменьшению внутренних напряжений. Кроме того, уменьшает величину внутренних напряжений и протекающий при среднем отпуске процесс распада мартенсита на феррит и цементит и диффузии углерода из обогащенных углеродом областей мартенсита [42, 45]. Образующиеся при таком процессе фазы феррита и обедненного мартенсита обладают более низкой твердостью по сравнению с первоначальной фазой мартенсита, что и обуславливает происходящее уменьшение величины внутренних напряжений и, как следствие, происходит разупрочнение [38, 47].

Для образца, изготовленного из стали Ст3, отпущенного при 650 °С, отклонение от обнаруженных зависимостей может быть связано с протекающим процессом коагуляции частиц цементита и увеличения среднего размера зерна. Протекание этих процессов приводит к тому, что структура приближается к равновесному состоянию [23, 38–42]. Увеличение среднего размера зерна и уменьшение количества зерен, наблюдаемых на микрошлифе, приводит к увеличению протяженности большеугловых границ, что обуславливает уменьшение величины внутренних напряжений, следовательно, искажений кристаллической решетки, которые они вызывают. Процесс укрупнения зерна останавливается при достижении «критического размера». Разупрочнение стали и образование более мягких фаз значительным образом сказываются на величинах коэрцитивной силы и предела прочности. Протекающие при этой термообработке процессы также приводят к снижению величины фактора разнотерности.

Выводы

1. Установлено, что для предела прочности, внутренних напряжений, коэрцитивной силы и фактора разнотерности для сталей 09Г2С, 15ХСНД и Ст3 наблюдаются общие удовлетворительные корреляционные зависимости. Проведенный математический анализ полученных

зависимостей, результаты которого говорят о наличии взаимосвязи между анализируемыми параметрами, показал, что при проведении определения величины фактора разнотерности по различным критериям (площади или диаметра зерна) он не оказывает существенного влияния на наличие взаимосвязи между данной величиной и пределом прочности, величиной внутренних напряжений и коэрцитивной силой.

2. Полученные результаты, представленные в работе, показывают, что наблюдаемые выпадения некоторых точек, соответствующие характерным термическим воздействиям, приводящим к определенным структурно-фазовым изменениям, влияющим на однородность структуры стали, искажения в кристаллической решетке, вызваны наличием большеугловых границ и другими факторами. Отличие в процессах, протекающих в рассматриваемых сталях, связаны с процентным содержанием в них легирующих элементов.

3. Проведенный анализ можно рассматривать как концепцию развития структурного определения внутренних механизмов многофазной системы, в качестве которой рассматривается сталь, влияющих на механические и магнитные свойства сталей. Использование приведенных данных о влиянии дисперсности структуры на параметры стали позволит предсказать опасные состояния конструкций, возникающих при механических нагрузках, а также разработать наиболее эффективные методы диагностирования.

Список литературы

1. Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 38–50. – DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.03.
2. Experimental determination and prediction of the mechanical properties of steel 1.7225 / J. Brnic, G. Turkalj, M. Canadija, J. Niu // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 600. – P. 47–52. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.097.
3. Zambrano O.A., Coronado J.J., Rodríguez S.A. Mechanical properties and phases determination of low carbon steel oxide scales formed at 1200° C in air // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 282. – P. 155–162. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.10.028.

4. Surface morphology characteristics and mechanical properties of corroded cold-formed steel channel sections / B. Nie, S. Xu, Z. Zhang, A. Li // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 42. – P. 102786. – DOI: 10.1016/j.job.2021.102786.

5. Determination of surface mechanical property and residual stress stability for shot-peened SAF2507 duplex stainless steel by in situ X-ray diffraction stress analysis / M. Chen, Sh. Xing, H. Liu, Ch. Jiang, K. Zhan, V. Ji // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, iss. 4. – P. 7644–7654. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.028.

6. Determination of the mechanical properties of surface-modified layer of 18CrNiMo7-6 steel alloys after carburizing heat treatment / M.H. Zhao, X.C. Han, G. Wang, G.T. Xu // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 148. – P. 84–93. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.08.021.

7. Сандомирский С.Г. Корреляционные зависимости между механическими свойствами и магнитным параметром стали 40X // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3 (48). – С. 43–50.

8. Исследование деформации и оценка напряжений в материалах с упрочненным поверхностным слоем магнитными методами / Э.С. Горкунов, С.Ю. Митропольская, А.Л. Осинцева, Д.И. Вичужанин // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 95–104.

9. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали / И.М. Полетика, Н.М. Егорова, О.А. Куликова, Л.Б. Зуев // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, № 3. – С. 37–40.

10. Relationship between microstructure and yield strength for plain carbon steel with ultrafine or fine (ferrite+cementite) structure / Ch. Zheng, L. Li, W. Yang, Z. Sun // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 617. – P. 31–38. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.08.050.

11. Zheng Ch., Li L. Effect of microstructure on mechanical behavior for eutectoid steel with ultrafine- or fine-grained ferrite+cementite structure // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 688. – P. 83–91. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.01.082.

12. Tensile properties and twinning behavior of high manganese austenitic steel with fine-grained structure / R. Ueji, N. Tsuchida, D. Terada, N. Tsuji, Y. Tanaka, A. Takemura, K. Kunishige // Scripta Materialia. – 2008. – Vol. 59, iss. 9. – P. 963–966. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.06.050.

13. Substructure hardening in duplex low density steel / H.R. Abedi, A. Zarei Hanzaki, K.-L. Ou, C.-Y. Yu // Materials and Design. – 2017. – Vol. 116. – P. 472–480. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.020.



14. Elastoplastic transition in a metastable β -Titanium alloy, Timetal-18 – An in-situ synchrotron X-ray diffraction study / J.J. Bhattacharyya, S. Nair, D.C. Pagan, V. Tari, R.A. Lebensohn, A.D. Rollett, S.R. Agnew // International Journal of Plasticity. – 2021. – Vol. 139. – P. 102947. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102947.
15. Motaman S.A.H., Haase Ch. The microstructural effects on the mechanical response of polycrystals: a comparative experimental-numerical study on conventionally and additively manufactured metallic materials // International Journal of Plasticity. – 2021. – Vol. 140. – P. 102941. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102941.
16. Motaman S.A.H., Roters F., Haase Ch. Anisotropic polycrystal plasticity due to microstructural heterogeneity: a multi-scale experimental and numerical study on additively manufactured metallic materials // Acta Materialia. – 2020. – Vol. 185. – P. 340–369. – DOI: 10.1016/j.actamat.2019.12.003.
17. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Введ. 1967–01–01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 62 с.
18. Гроховский В.И. Возможности цифровой микроскопии в металлографии // Цифровая микроскопия: Материалы школы семинара. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – С. 18–20.
19. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Влияние разнородности структуры на коррозионную стойкость наружной поверхности труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 37–44.
20. Определение взаимосвязи фактора разнородности и скорости коррозии конструкционной стали / Р.А. Соколов, В.Ф. Новиков, К.Р. Муратов, А.Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 106–125. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125.
21. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Введ. 1983–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 45 с.
22. Влияние структурно-фазового состояния накомпозигов железо – цементит на процессы локальной активации / А.В. Сюгаев, С.Ф. Ломаева, С.М. Решетников, А.С. Шуравин, Е.Ф. Шарафеева, Д.В. Сурнин // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 395–399.
23. Счастливцев В.М., Мурзаев Д.А., Яковлева И.Л. Структура термически обработанной стали. – М.: Metallurgy, 1994. – 288 с.
24. Callister W.D. Materials science and engineering: an introduction. – 6th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2020. – 848 p. – ISBN 978-0471135760.
25. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain sizes using X-ray diffractometry method / R.A. Sokolov, V.F. Novikov, K.R. Muratov, A.N. Venediktov // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19, pt. 5. – P. 2584–2585. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015.
26. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1978. – 568 с.
27. Чулкина А.А., Ульянов А.И. Влияние магнитных свойств цементита на коэрцитивную силу высокоуглеродистых сталей после закалки и отпуска // Физика металлов и металловедение. – 2009. – Т. 108, № 6. – С. 581–588.
28. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. – 266 с.
29. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик термически обработанных изделий (обзор) // Дефектоскопия. – 1985. – № 3. – С. 3–21.
30. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
31. Бидя Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
32. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Metallurgy, 1978. – 392 с.
33. Ryan T.P. Modern regression methods. – 2nd ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2008. – 672 p.
34. Sprent P., Smeeton N.C. Applied nonparametric statistical methods. – 3rd ed. – London, UK: Chapman & Hall/CRC, 2001. – 470 p.
35. Scheffe H. The analysis of variance. – New York: Wiley, 1959. – 267 p.
36. Faraway J.J. Practical regression and anova using R. – URL: <https://cran.r-project.org/doc/contrib/Faraway-PRA.pdf> (accessed: 24.09.2021).
37. The R Manuals / ed. by the R Development Core Team. – URL: <https://cran.r-project.org/manuals.html> (accessed: 24.09.2021).
38. Влияние зернограницных сегрегаций на температуры мартенситного превращения в бикристаллах NiTi / Р.И. Бабицева, А.С. Семенов, С.В. Дмитриев, К. Жоу // Письма о материалах. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 162–167. – На англ. яз.
39. Wollenberger H.J. Point defects // Physical metallurgy / ed. by R.W. Cahn, P. Haasen. – Amsterdam: Elsevier, 1996. – Vol. 2. – P. 1621–1721. – ISBN 978-0-444-89875-3. – DOI: 10.1016/B978-044489875-3/50023-5.
40. Rohrer G.S. Structure and bonding in crystalline materials. – Cambridge: Cambridge University Press,

2004. – 552 p. – ISBN 9780511816116. – DOI: 10.1017/CBO9780511816116.

41. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 208 с.

42. Фазовые и структурные превращения в низкоуглеродистых мартенситных сталях / Л.М. Клейнер, Д.М. Ларинин, Л.В. Спивак, А.А. Шацов // Физика металлов и материаловедение. – 2009. – Т. 108, № 2. – С. 161–168.

43. Gao F., Heinisch H., Kurtz R.J. Diffusion of He interstitials in grain boundaries in α -Fe // Journal of Nuclear Materials. – 2006. – Vol. 351. – P. 133–140. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.02.015.

44. Hart E.W. On the role of dislocations in bulk diffusion // Acta Metallurgica. – 1957. – Vol. 5, iss. 10. – P. 597. – DOI: 10.1016/0001-6160(57)90127-X.

45. Courtney T.H. Mechanical behavior of materials. – Singapore: McGraw Hill, 2000. – 752 p. – ISBN 978-1577664253.

46. Study of defect evolution by TEM with in situ ion irradiation and coordinated modeling / M. Li, M.A. Kirk, P.M. Baldo, D. Xu, B.D. Wirth // Philosophical Magazine. – 2012. – Vol. 92. – P. 2048–2078. – DOI: 10.1080/14786435.2012.662601.

47. Noyan I.C., Cohen J.B. Residual stress – measurement by diffraction and interpretation. – New York: Springer, 1987. – 285 p. – ISBN 978-1-4613-9570-6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

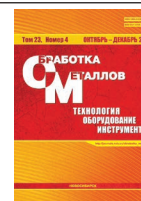
© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Assessment of the effect of the steels structure dispersion on its magnetic and mechanical properties

Roman Sokolov^{a,*}, Vitaly Novikov^b, Kamil Muratov^c, Anatolii Venediktov^d

Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>, falcon.rs@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1987-351X>, vitaly.nowikov2017@yandex.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>, muratows@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6899-4297>, annatolii@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 June 2021

Revised: 06 August 2021

Accepted: 23 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

SEM

Tempering temperature

Grain size variation factor

Coercive force

Internal stresses

Grain size

Tensile strength

ABSTRACT

Introduction: The control of the mechanical properties of structural steels is one of the main processes that regulate the service life of equipment. In most technical processes (pressure treatment, welding, rolling, thermal exposure), structure changes both in local areas and in the entire volume. Changes in the steel structure entail changes in its properties and as a result in local areas, at various stages of operation, the likelihood of the occurrence and development of critical defects increases. Its presence significantly affects the performance of the equipment, and leads to premature aging of the material and its failure. Precisely because the control of the mechanical properties of steel remains one of the urgent problems, new control methods are being developed. It is known that all properties of steel depend on the structure of the substance, however, studies on the effect of the dispersion of the structure under consideration on the mechanical properties are presented in an insignificant amount. **Purpose:** to analyze from a mathematical point of view the influence of the factor of different grain size, as a parameter reflecting the dispersity of the system, on the mechanical properties of structural steel. **The paper studies** a heat-treated planar samples of steels 15KhSND, 09G2S and St3. **Methods of research:** scanning electron and optical microscopes are used to study the grain structure and grain boundaries; SIAMS 700 software package is used for finding the boundaries and average data of the grain structure; portable X-ray fluorescence analyzer of metals and alloys X-MET 7000 is used to determine the chemical composition of the test samples in percentage; tensile testing machine IR-50 is used for measuring the tensile strength of samples; Vickers hardness tester is used to determine the hardness of samples. **Results and discussion:** it is found that there is a satisfactory correlation for the mechanical properties of structural steels (hardness and ultimate strength) and the grain size factor, which can be used to predict the hazardous states of structures and the operating time. The analysis of variance and regression of the detected dependencies is carried out. It is noted that the dropout of some values from the general regression dependence can most likely be associated with a decrease in the value of internal stresses as a result of a decrease in the distortions of the crystal lattice of steel occurring during heat treatment. It should be noted that the processes occurring and the degree of its influence on the properties of the structural steels under consideration can be different due to the presence of different amounts of alloying elements in the composition of the studied steels.

For citation: Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Assessment of the effect of the steels structure dispersion on its magnetic and mechanical properties. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 93–110. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110. (In Russian).

References

1. Novikov V.F., Neradovskii D.F., Sokolov R.A. Ispol'zovanie kvazistaticheskikh petel' magnitnogo gisterezisa dlya kontrolya struktury stali [The using of quasi-static magnetic hysteresis loops to control steel structures]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 38–49. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.03.

* Corresponding author

Sokolov Roman A., Post-graduate Student, Assistant
 Industrial University of Tyumen,
 38 Volodarskogo str.,
 625000, Tyumen, Russian Federation
 Tel.: 8 (919) 925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru

2. Brnic J., Turkalj G., Canadija M., Niu J. Experimental determination and prediction of the mechanical properties of steel 1.7225. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 600, pp. 47–52. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.097.
3. Zambrano O.A., Coronado J.J., Rodríguez S.A. Mechanical properties and phases determination of low carbon steel oxide scales formed at 1200° C in air. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 282, pp. 155–162. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.10.028.
4. Nie B., Xu S., Zhang Z., Li A. Surface morphology characteristics and mechanical properties of corroded cold-formed steel channel sections. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 42, p. 102786. DOI: 10.1016/j.job.2021.102786.
5. Chen M., Xing Sh., Liu H., Jiang Ch., Zhan K., Ji V. Determination of surface mechanical property and residual stress stability for shot-peened SAF2507 duplex stainless steel by in situ X-ray diffraction stress analysis. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, iss. 4, pp. 7644–7654. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.028.
6. Zhao M.H., Han X.C., Wang G., Xu G.T. Determination of the mechanical properties of surface-modified layer of 18CrNiMo7-6 steel alloys after carburizing heat treatment. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol. 148, pp. 84–93. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.08.021.
7. Sandomirskii S.G. Korrelyatsionnye zavisimosti mezhdu mekhanicheskimi svoistvami i magnitnym parametrom stali 40Kh [Correlation dependences between mechanical properties and magnetic parameter of the 41CR4 steel]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2019, no. 3 (48), pp. 43–50.
8. Gorkunov E.S., Mitropolskaya S.Yu., Osintseva A.L., Vichuzhanin D.I. Issledovanie deformatsii i otsenka napryazhenii v materialakh s uprochnennym poverkhnostnym sloem magnitnymi metodami [Magnetic methods for deformation investigation and stress estimation in surface-hardened materials]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2009, vol. 12, no. 2, pp. 95–104. (In Russian).
9. Poletika I.M., Egorova N.M., Kulikova O.A., Zuev L.B. Ob ul'trazvukovom kontrole neodnorodnosti mekhanicheskikh svoistv goryachekatanoi stali [Supersonic testing of mechanical property uniformity in hot-rolled steel]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics Journal*, 2001, vol. 71, no. 3, pp. 37–40. (In Russian).
10. Zheng Ch., Li L., Yang W., Sun Z. Relationship between microstructure and yield strength for plain carbon steel with ultrafine or fine (ferrite+cementite) structure. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 617, pp. 31–38. DOI: 10.1016/j.msea.2014.08.050.
11. Zheng Ch., Li L. Effect of microstructure on mechanical behavior for eutectoid steel with ultrafine- or fine-grained ferrite+cementite structure. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 688, pp. 83–91. DOI: 10.1016/j.msea.2017.01.082.
12. Ueji R., Tsuchida N., Terada D., Tsuji N., Tanaka Y., Takemura A., Kunishige K. Tensile properties and twinning behavior of high manganese austenitic steel with fine-grained structure. *Scripta Materialia*, 2008, vol. 59, iss. 9, pp. 963–966. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.06.050.
13. Abedi H.R., Zarei Hanzaki A., Ou K.-L., Yu C.-H. Substructure hardening in duplex low density steel. *Materials and Design*, 2017, vol. 116, pp. 472–480. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.020.
14. Bhattacharyya J.J., Nair S., Pagan D.C., Tari V., Lebensohn R.A., Rollett A.D., Agnew S.R. Elastoplastic transition in a metastable β -Titanium alloy, Timetal-18 – An in-situ synchrotron X-ray diffraction study. *International Journal of Plasticity*, 2021, vol. 139, p. 102947. DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102947.
15. Motaman S.A.H., Haase Ch. The microstructural effects on the mechanical response of polycrystals: a comparative experimental-numerical study on conventionally and additively manufactured metallic materials. *International Journal of Plasticity*, 2021, vol. 140, p. 102941. DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102941.
16. Motaman S.A.H., Roters F., Haase Ch. Anisotropic polycrystal plasticity due to microstructural heterogeneity: a multi-scale experimental and numerical study on additively manufactured metallic materials. *Acta Materialia*, 2020, vol. 185, pp. 340–369. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.12.003.
17. GOST 6996–66. *Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoistv* [State Standard 6996–66. Welded joints. Methods of mechanical properties determination]. Moscow, Standards Publ., 2005. 62 p.
18. Grokhovskiy V.I. [Possibilities of digital microscopy in metallography]. *Tsifrovaya mikroskopiya: materialy shkoly seminara* [Digital microscopy. School-seminar materials]. Ekaterinburg, USTU-UPI Publ., 2001, pt. 1, pp. 18–20. (In Russian).
19. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Vliyanie raznozernistosti struktury na korrozionnyuyu stoikost' naruzhnoi poverkhnosti trub iz uglerodistoi stali 20, primenyaemykh v teploenergetike [Influence of the uneven grain structure on the corrosion resistance of the outer surface of pipes made of carbon steel 20 used in heat power engineering]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 37–44.



20. Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Opredelenie vzaimosvyazi faktora raznozemnosti i skorosti korrozii konstruktsionnoi stali [Determination of the relationship between the factor of grain size factor and the corrosion rate of structural steel]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 106–125. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125.

21. GOST 5639–82. *Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [State Standard 5639–82. Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size]. Moscow, Standards Publ., 2003. 45 p.

22. Syugaev A.V., Lomaeva S.F., Reshetnikov S.M., Shuravin A.S., Sharafeeva E.V., Surnin D.V. The effect of the structure-phase state of iron-cementite nanocomposites on local activation processe. *Protection of Metals*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 367–371. DOI: 10.1134/S0033173208040097. Translated from *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 395–399.

23. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L. *Struktura termicheskoi obrabotannoi stali* [Structure of heat treated steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 288 p.

24. Callister W.D. *Materials science and engineering: an introduction*. 6th ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2020. 848 p. ISBN 978-0471135760.

25. Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain sizes using X-ray diffractometry method. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, pt. 5, pp. 2584–2585. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015.

26. Gorelik S.S. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 568 p.

27. Chulkina A.A., Ul'yanov A.I. Vliyanie magnitnykh svoystv tsementita na koertsitivnyuyu silu vysokouglerodistykh staley posle zakalki i otpuska [Influence of the magnetic properties of cementite on the coercive force of high-carbon steels after quenching and tempering]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2009, vol. 108, no. 6, pp. 581–588. (In Russian).

28. Shcherbinin V.E., Gorkunov E.S. *Magnitnye metody strukturnogo analiza i nerazrushayushchego kontrolya* [Magnetic methods of structural analysis and non-destructive testing]. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS Publ., 1996. 266 p.

29. Mikheev M.N., Gorkunov E.S. Magnitnye metody nerazrushayushchego kontrolya strukturnogo sostoyaniya i prochnostnykh kharakteristik termicheskoi obrabotannykh izdelii (obzor) [Magnetic methods for non-destructive testing of the structural state and strength characteristics of heat-treated products]. *Defektoskopiya = Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1985, no. 3, pp. 3–21. (In Russian).

30. Mikheev M.N., Gorkunov E.S. *Magnitnye metody strukturnogo analiza i nerazrushayushchego kontrolya* [Magnetic methods of structural analysis and non-destructive testing]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 252 p.

31. Bida G.V., Nichipuruk A.P. *Magnitnye svoystva termoobrabotannykh staley* [Magnetic properties of heat-treated steels]. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS Publ., 2005. 218 p.

32. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 392 p.

33. Ryan T.P. *Modern regression methods*. 2nd ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2008. 672 p.

34. Sprent P., Smeeton N.C. *Applied nonparametric statistical methods*. 3rd ed. London, UK, Chapman & Hall/CRC, 2001. 470 p.

35. Scheffe H. *The analysis of variance*. New York, Wiley, 1959. 267 p.

36. Faraway J.J. *Practical regression and anova using R*. Available at: <https://cran.r-project.org/doc/contrib/Faraway-PRA.pdf> (accessed 24.09.2021).

37. The R Development Core Team, ed. *The R manuals*. Available at: <https://cran.r-project.org/manuals.html> (accessed 24.09.2021).

38. Babicheva R.I., Semenov A.S., Dmitriev S.V., Zhou K. Effect of grain boundary segregations on martensitic transformation temperatures in NiTi bi-crystals. *Pis'ma o materialakh = Letters on Materials*, 2019, vol. 9 (2), pp. 162–167. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-2-162-167.

39. Wollenberger H.J. Point defects. *Physical metallurgy*. Ed. by R.W. Cahn, P. Haasen. Amsterdam, Elsevier, 1996, vol. 2, pp. 1621–1721. ISBN 978-0-444-89875-3. DOI: 10.1016/B978-044489875-3/50023-5.

40. Rohrer G.S. *Structure and bonding in crystalline materials*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004. 552 p. ISBN 9780511816116. DOI: 10.1017/CBO9780511816116.

41. Novikov I.I. *Defekty kristallicheskogo stroeniya metallov* [Defects in the crystal structure of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 208 p.

42. Kleiner L.M., Larinin D.M., Shatsov A.A., Spivak L.V. Fazovye i strukturnye prevrashcheniya v nizkouglerodistykh martensitnykh stalyakh [Phase and structural transformations in low-carbon martensitic steels]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2009, vol. 108, no. 2, pp. 161–168. (In Russian).
43. Gao F., Heinisch H., Kurtz R.J. Diffusion of He interstitials in grain boundaries in α -Fe. *Journal of Nuclear Materials*, 2006, vol. 351, pp. 133–140. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.02.015.
44. Hart E.W. On the role of dislocations in bulk diffusion. *Acta Metallurgica*, 1957, vol. 5, iss. 10, p. 597. DOI: 10.1016/0001-6160(57)90127-X.
45. Courtney T.H. *Mechanical behavior of materials*. Singapore, McGraw Hill, 2000. 752 p. ISBN 978-1577664253.
46. Li M., Kirk M.A., Baldo P.M., Xu D., Wirth B.D. Study of defect evolution by TEM with in situ ion irradiation and coordinated modeling. *Philosophical Magazine*, 2012, vol. 92, pp. 2048–2078. DOI: 10.1080/14786435.2012.662601.
47. Noyan I.C., Cohen J.B. *Residual stress – measurement by diffraction and interpretation*. New York, Springer, 1987. 285 p. ISBN 978-1-4613-9570-6.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).