



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)









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



Влияние внутренних напряжений на интенсивность коррозионных процессов конструкционной стали

Роман Соколов^{a,*}, Камиль Муратов^b, Анатолий Венедиктов^c, Расул Мамадалиев^d

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

^a  <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>,  falcon.rs@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>,  muratows@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0002-6899-4297>,  annattoliy@gmail.com; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-0813-0961>,  mamadaliyeva@tyuiu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.24; 620.19

История статьи:

Поступила: 09 августа 2023

Рецензирование: 21 августа 2023

Принята к печати: 09 сентября 2023

Доступно онлайн: 15 декабря 2023

Ключевые слова:

Остаточные внутренние напряжения
Микроструктура
Степень анизотропии зерна
Конструкционная сталь
Остаточная деформация
Скорость коррозии

АННОТАЦИЯ

Введение. Поведение металла в коррозионной среде может быть неоднозначным, что связано с особенностями протекания коррозионного процесса. Влияние на процесс коррозии оказывают как внешние, так и внутренние факторы. Внешние факторы определяются температурой, влажностью, типом коррозионной среды и др. Внутренние факторы зависят от параметров системы (материала): наличия включений, фазового состава, структуры, величины внутренних остаточных напряжений. Внутренние факторы неоднозначно влияют на поведение материала в определенной агрессивной среде, что в конечном итоге сказывается на времени коррозионного разрушения материала и, как следствие, на времени эксплуатации объектов, изготовленных из данного материала. Потому дифференциация влияния различных внутренних факторов на скорость протекания коррозионного процесса в агрессивной среде является приоритетным направлением исследований. **Цель настоящей работы:** рассмотрение влияния величины внутренних остаточных напряжений на скорость коррозионного процесса в агрессивной среде – 5%-м растворе серной кислоты. **Объектом исследования** в работе является листовая прокат стали Ст3 в состоянии поставки после различной по величине пластической деформации, из которого были изготовлены исследуемые образцы. **Методы исследования.** Изучение микроструктуры деформированных образцов осуществлялось на оптическом микроскопе Olympus GX53; программное обеспечение SIAMS 800 использовалось для определения балла зеренной структуры и определения анизотропии структуры после деформации материала; рентгеновский дифрактометр ДРОН-7 – для регистрации дифрактограмм и определения величины внутренних напряжений; лабораторные весы SHIMADZU UW620h – для измерения массы исследуемых образцов. Растяжение образцов производилось на универсальной испытательной машине И1185М (100 кН). **Результаты и обсуждение.** Полученные результаты показывают, что пластическая деформация материала в направлении проката оказывает неоднозначное воздействие на анизотропию структуры. При повышении степени пластической деформации происходит неоднозначное изменение величины анизотропии зерна, что связано с внутренними эффектами протекающих в структуре материала процессов при пластической деформации, такими как скопление кристаллической решетки в направлениях $\{111\} \langle 110 \rangle$ и возникновение обратных остаточных внутренних напряжений из-за наличия в структуре стали включений. Однако при этом степень пластической деформации достаточно хорошо коррелирует с величиной внутренних остаточных напряжений. Рост величины внутренних остаточных напряжений приводит к возрастанию скорости коррозии конструкционной стали Ст3 в 5%-м растворе соляной кислоты. Полученная зависимость описывается линейным уравнением с высоким коэффициентом детерминации, что свидетельствует о наличии сильной связи между величиной внутренних остаточных напряжений и скоростью коррозии материала. При этом коэффициент влияния величины внутренних напряжений на скорость коррозии равен 0,72, что дополнительно доказывает наличие взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами.

Для цитирования: Влияние внутренних напряжений на интенсивность коррозионных процессов конструкционной стали / Р.А. Соколов, К.Р. Муратов, А.Н. Венедиктов, Р.А. Мамадалиев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 167–179. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-167-179.

Введение

Наличие в изделии из стали остаточных напряжений может привести к короблению поверхности, образованию трещин при механических воздействиях, изменению поведения конструкций при различных по характеру нагрузках и способствует ускоренному коррозион-

*Адрес для переписки

Соколов Роман Александрович, аспирант, ассистент
Тюменский индустриальный университет,
ул. Володарского, 38,
625000, г. Тюмень, Россия
Тел.: +7 (919) 925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru

ному процессу [1–3]. Ввиду того что на площадках промышленных предприятий в большинстве случаев оборудование работает с ускоряющими процесс коррозии агрессивными средами, наличие внутренних напряжений, влияющих на этот процесс, становится значительным фактором. Однако не стоит забывать, что в процессе коррозионного разрушения имеют место различные механизмы [8–11], связанные с наличием включений, величиной внутренних напряжений, дисперсностью материала и др. Влияние этих механизмов на коррозионный процесс неоднозначно, именно по этой причине необходимо четко дифференцировать оказываемое на коррозионные процессы воздействие со стороны напряжений второго рода.

Существуют термические методы обработки изделий, уменьшающие внутренние напряжения, например отжиг, отпуск и обработка холодом [7]. Применение термических методов может снизить прочность материала или даже привести к повышенной коррозионной восприимчивости.

Для уменьшения внутренних остаточных напряжений могут использоваться и механические методы. Наибольшее распространение получил метод, основанный на растяжении материала при комнатной температуре. Сущность метода заключается в пластической деформации материала, не превышающей 0,5–2%. [4]

Следует уточнить, что под пластической деформацией понимается остающееся после прекращения действия внешних напряжений изменение геометрических размеров [5]. Уменьшение величины внутренних напряжений при подобного рода пластической деформации связано с незначительным искажением кристаллической решетки металла под действием касательных напряжений, в результате чего наблюдается необратимое перемещение атомов. После снятия внешних растягивающих напряжений происходит устранение упругой составляющей деформации [17, 18]. Незначительная часть деформации, остается, а материал почти полностью освобождается от остаточных напряжений [6]. Пластическая деформация происходит за счет процессов скольжения и двойникования, в результате чего наблюдается увеличение числа линейных дефектов в виде дислокаций [3, 7].

Проанализированные литературные источники показывают, что влияние остаточного на-

пряженного состояния материала на скорость протекания коррозии изучено не в полной мере [1–3]. В литературных источниках в основном рассматривается зависимость электрохимической коррозии металла от величины растягивающего напряжения, прикладываемого к объекту [3], но отсутствуют данные, отражающие начальное состояние материала и его влияние на скорость коррозионного процесса.

Исходя из вышеизложенного, в настоящей работе рассматривается влияние, оказываемое пластической деформацией материала на скорость коррозии низколегированной малоуглеродистой стали Ст3.

Методика исследований

Результаты, приведенные в данной работе, получены на образцах, которые изготовлены из листового проката стали Ст3, находящегося в состоянии поставки. Сталь Ст3 широко применяется при изготовлении различных металлоконструкций, труб и оборудования.

Образцы были вырезаны поперек направления проката. Размеры образцов: 4,0×70,0×25,0 мм.

Определение внутренних напряжений производилось на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 по методике С.С. Горелика [3]. Методика основана на сравнении данных, полученных на исследуемом образце, с данными, полученными на эталонном образце, в качестве которого использовался отожженный материал с минимальной величиной внутренних остаточных напряжений.

Коррозионные испытания образцов выполнялись в лабораторных условиях в течение 72 часов при температуре 20 °С. В качестве агрессивной среды использовался 5%-й раствор соляной кислоты. Контейнер с исследуемыми образцами и агрессивной средой находился в термостате, прямой контакт между исследуемыми образцами отсутствовал. Масса образцов определялась при помощи лабораторных весов SHIMADZU UW620h как среднее значение по трем проведенным измерениям. Геометрические размеры образцов определялись при помощи штангенциркуля.

Коррозионные испытания проводились согласно методике [6]. Критерием оценки коррозионного воздействия выбрана скорость коррозии, которая рассчитывается по формуле

$$v = \frac{\Delta m}{St}, \quad (1)$$

где Δm – относительная убыль массы (гр); S – площадь поверхности образца, находящаяся в контакте с агрессивной средой (м^2); t – время контакта образца с агрессивной средой (сутки).

Растяжение образцов производилось на универсальной испытательной машине И1185М (100 кН). Погрешность измерения нагрузки не более $\pm 1\%$.

Структура материала анализировалась в программном комплексе SIAMS 800. Некоторые полученные результаты отражены в работах [10, 11, 15, 16].

Результаты и их обсуждение

Вырезанные поперек проката образцы деформировались при медленном нагружении со скоростью не более 0,1 мм/с. Образец № 2 был деформирован на 1,5 %, № 3 – на 3,0 %, № 4 – на 4,5 %, № 5 – на 6,6 %. Образец № 1 не был деформирован, он имеет наименьшие значения величины внутренних напряжений. Это отличие от теории связано с тем, в каком направлении был вырезан образец из пластины металла, изготовленного прокаткой. Под деформацией подразумевается изменение длины образца, выраженное в процентах относительно первоначального размера.

Микроструктура исследуемых образцов показана на рис. 1.

При анализе микрошлифа установлено, что структура представляет собой феррито-перлитную смесь в соотношении 81,7 % феррита и 18,3 % перлита. Балл структуры – 8 согласно ГОСТ 8233, минимальное значение балла зерна – 8, максимальное значение балла зерна – 13, наибольшее по занимаемой на микрошлифе области – 11.

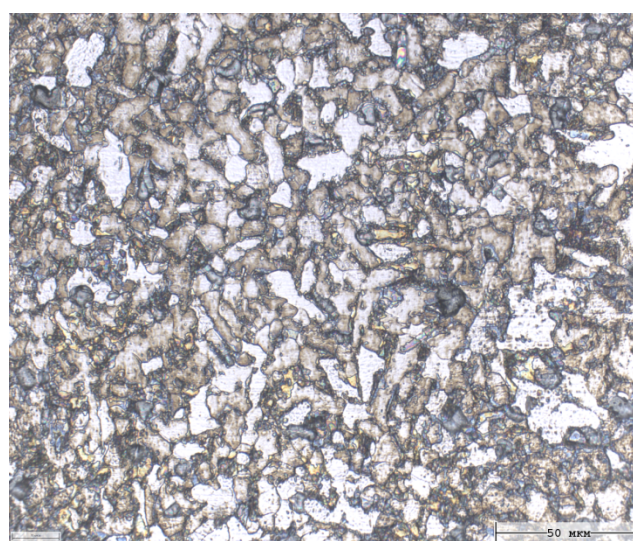
При прокатке металла происходит вытягивание зерен в направлении прокатки и, следовательно, перераспределение внутренних напряжений; максимальная их величина будет наблюдаться также в указанном направлении. Об этом можно судить по дифрактограммам (рис. 2).

Образцы растягивались со скоростью 0,1 мм/мин. В табл. 1 представлены результаты определения основных механических свойств для образца № 5, а на рис. 3 – диаграмма растяжения для образца № 5.

Поскольку образцы были вырезаны поперек направления проката, то закономерно предположить, что наименьшие значения величины внутренних напряжений будут наблюдаться в исходном состоянии в продольном направлении относительно внешней нагрузки. При деформации может происходить перераспределение напряжений, и их величина может увеличиться (рис. 4).



a



б

Рис. 1. Микроструктура образца № 1 (*a*) и образца № 3 (*б*) при увеличении $\times 500$

Fig. 1. Microstructure of the specimens at magnification of 500X:

a – specimen No.1; *б* – specimen No.3

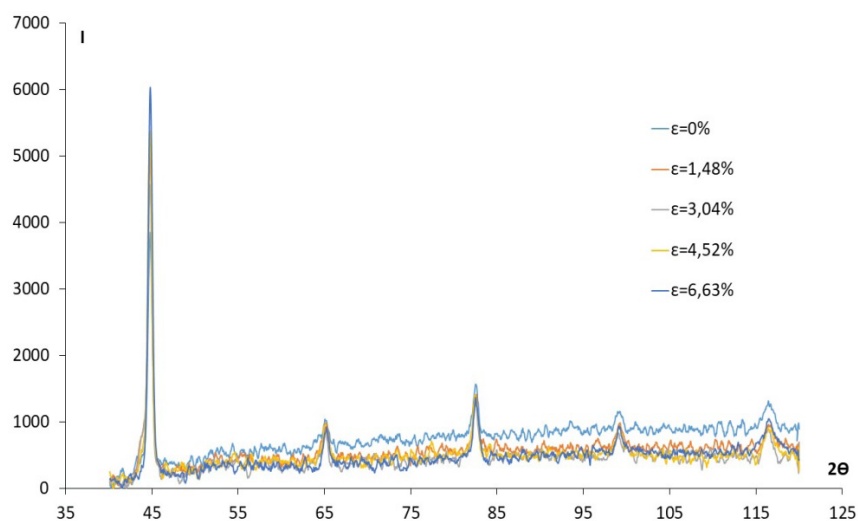


Рис. 2. Дифрактограммы, полученные на исследуемых образцах стали Ст3

Fig. 2. Diffraction patterns obtained on the specimens being studied

Таблица 1

Table 1

Механические характеристики образца № 5

Mechanical characteristics of specimen No.5

Предел текучести верхний	1220 Н
Предел текучести нижний	1210 Н
Предел текучести условный	1130 Н

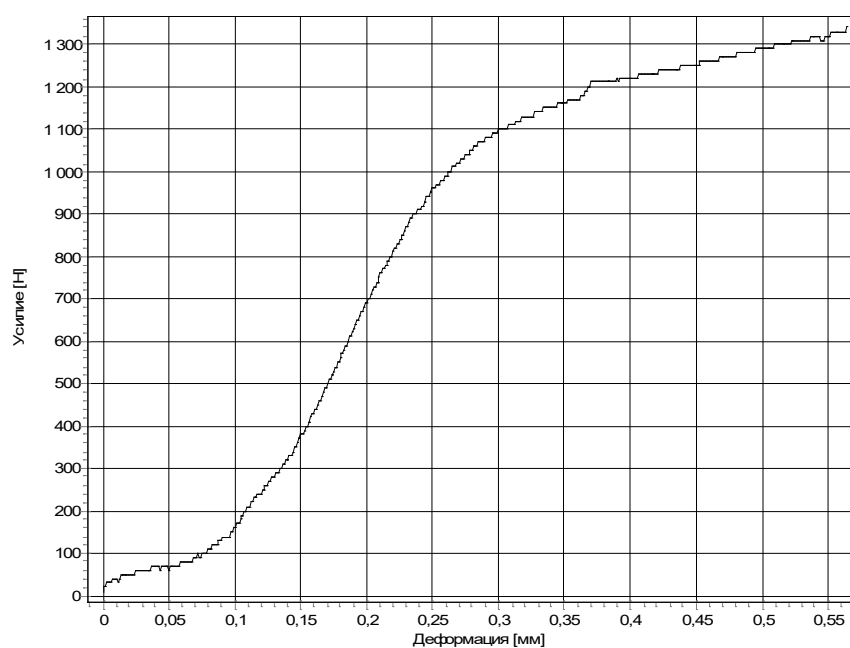


Рис. 3. Диаграмма растяжения для образца № 5

Fig. 3. Tensile diagram for specimen No.5

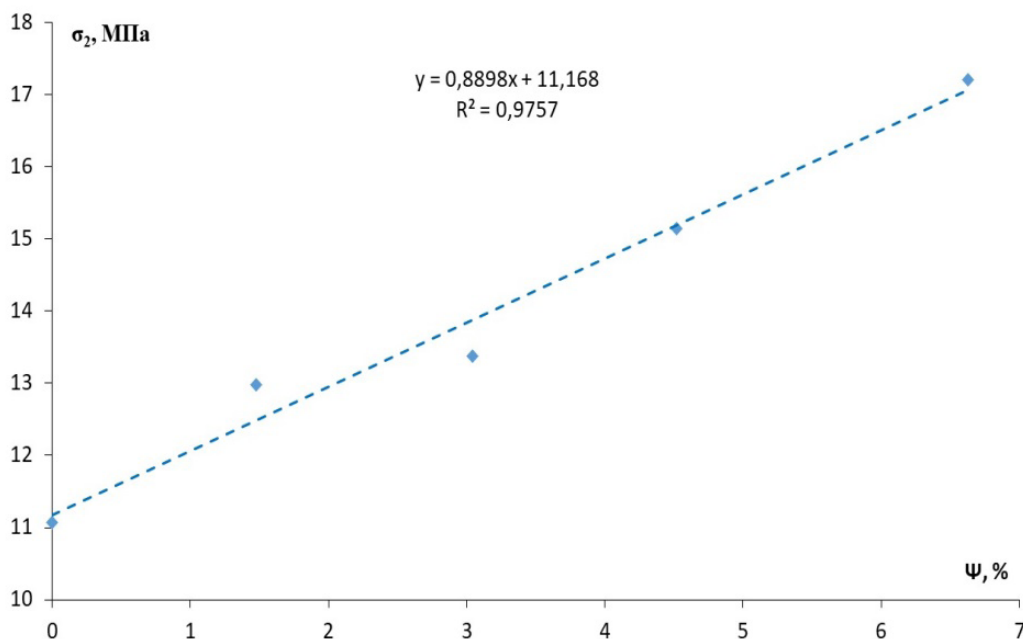


Рис. 4. Изменение величины внутренних напряжений при увеличении степени остаточной деформации материала

Fig. 4. Change in the values of internal stresses with increasing degree of residual deformation of the material

Из рис. 4 видно, что при увеличении пластической деформации образцов происходит рост величины внутренних остаточных напряжений в направлении проката. После деформирования образцов были проведены коррозионные испытания, результаты которых приведены на рис. 5.

Испытания проводились в термостате при постоянной температуре. Для уточнения полученных данных эксперимент был проведен два раза. Предварительно образцы были подготовлены путем электрохимического травления.

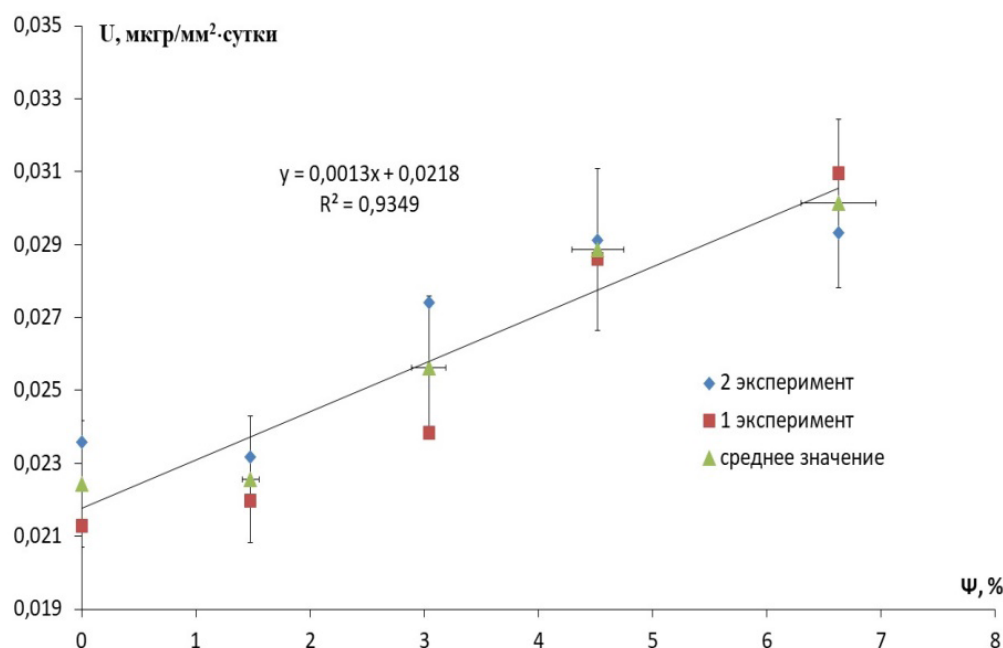


Рис. 5. Зависимость величины скорости коррозии от величины деформации образца

Fig. 5. Dependence of the corrosion rate on the specimen deformation

Видно, что скорость коррозии возрастает с увеличением деформации материала, что также обусловлено увеличением величины внутренних напряжений (рис. 6).

Как можно видеть из рис. 6, скорость коррозии имеет линейную зависимость от величины внутренних напряжений. Стоит отметить, что изменение размеров зерен в данном эксперименте в максимальной величине составляло 20 % от исходных (табл. 2). На рис. 7 представлено обработанное в программе SIAMS 800 изображение структуры материала образца № 3 при увеличении в 500 раз. Красным цветом выделены границы зерен.

Максимальное изменение наблюдалось при деформации материала, равной 3 %, затем в структуре происходили релаксационные процессы и величины зерна в двух направлениях выравнивались, что приводило к уменьшению средних значений. Для сопоставления используются средние значения максимальных размеров зерна в продольном и поперечном направлении относительно внешней растягивающей силы (рис. 8).

О протекании данного процесса говорит и изменение продольных и поперечных размеров зерна, выраженное в степени его анизотропии (рис. 9). Степень анизотропии определяется

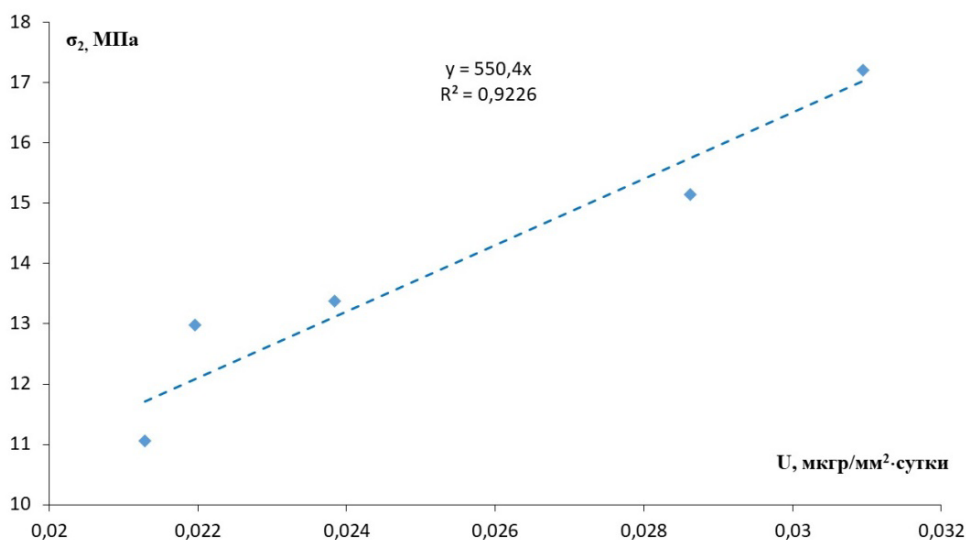


Рис. 6. Зависимость величины внутренних напряжений от средней скорости коррозии (по результатам двух экспериментов)

Fig. 6. Dependence of the internal stresses on the average corrosion rate (based on the results of 2 experiments)

Таблица 2

Table 2

Некоторые параметры исследуемых образцов
Some parameters of the specimen being investigated

D_{\min} , мкм	2,56	2,82	3,04	2,95	2,87
L , мм	0	0,370	0,760	1,130	1,590
Ψ , %	0	1,48	3,04	4,52	6,63
Δd , %	0	10,07	18,71	15,33	12,09

D_{\min} – минимальные размеры зерна;

L – удлинение образца;

Ψ – остаточная деформация образца;

Δd – среднее изменение величины зерна при деформации материала.

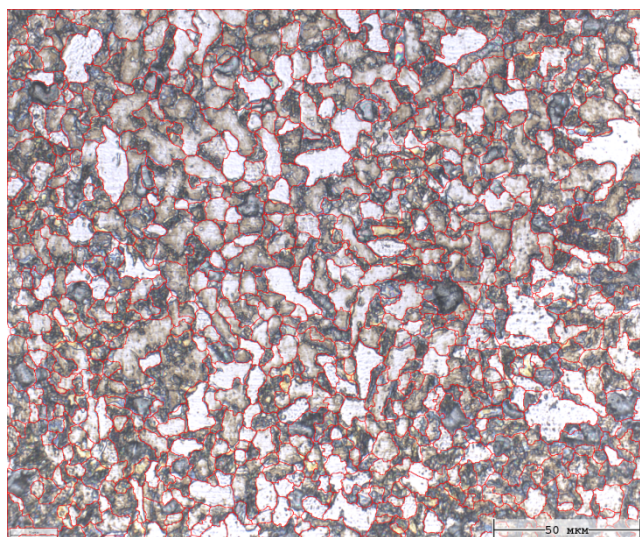


Рис. 7. Микроструктура образца № 3 при увеличении $\times 500$ с построенными границами зерен

Fig. 7. Microstructure of specimen No.3 at 500X magnification with constructed grain boundaries

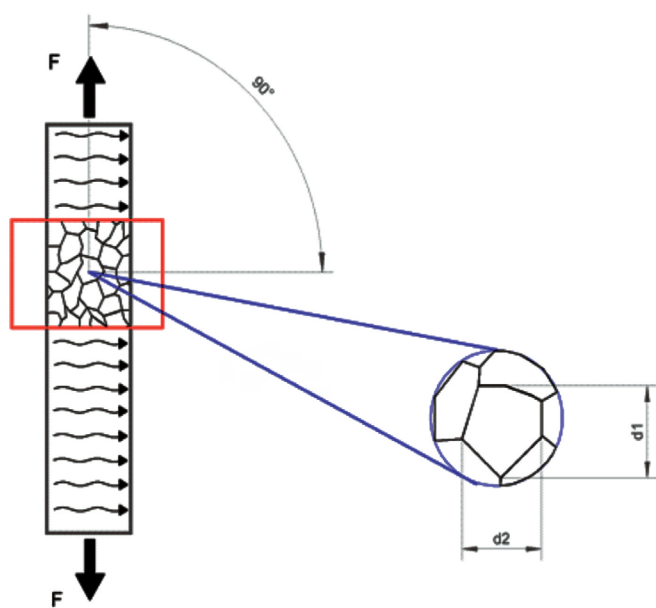


Рис. 8. Схематическое изображение исследуемого образца с текстурой, сформированной прокатом материала

Fig. 8. Schematic representation of the specimen being investigated with texture formed by rolling

как отношение поперечного $d2$ и продольного $d1$ размера зерна.

Следует отметить, что с увеличением деформации материала происходит и рост плотности дислокаций в материале: тем сильнее, чем сильнее оказывается воздействие на металл [24, 25].

Деформация на начальной стадии происходит за счет скольжения небольшого количества дислокаций, присутствующих в материале. При увеличении степени деформации материала возрастает количество движущихся в кристалле дислокаций. Это приводит к возрастанию столкновений между дислокациями, что затрудняет их дальнейшее скольжение, в результате чего образуются скопления, не способные перемещаться по кристаллу. Движение образующихся при деформации новых дислокаций ограничено скоплениями, вследствие чего происходит упрочнение металла [8]. Это может сказаться на средней величине зерна, определяемой методом рентгеновской дифрактометрии, и привести к увеличению степени анизотропии зерна.

Взаимосвязь коррозии и внутренних напряжений при пластической деформации обусловлена изменением количества дефектов структуры в кристалле. Такие изменения происходят путем скольжения дислокаций в пределах нескольких систем скольжения, характерных для наблюдаемой кристаллической решетки. Скольжение происходит по плоскостям и кристаллографическим направлениям, для которых характерна плотная упаковка атомов и, следовательно, наименьшее сопротивление сдвигу. Пластическая деформация в таком случае приводит дислокации в движение и увеличивает вероятность их аннигилирования при встрече с дислокацией другого знака [9, 17, 18].

В литературе указывается на то, что пластическая деформация фаз с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК) вызвана скольжением кристаллографических направлений $\{110\} \langle 111 \rangle$ [19].

Из-за включений в материале во время холодной прокатки могут возникать остаточные напряжения обратного знака [20]. Обратное напряжение может способствовать увеличению анизотропии материала, результаты подобного процесса мы можем наблюдать на рис. 6. Источниками анизотропии могут быть и другие особенности микроструктуры помимо текстуры и морфологии зерен, такие как ориентированные дислокационные структуры [21–23].

Для определения влияния внутренних напряжений на скорость коррозии воспользуемся коэффициентом влияния. Получение этого коэффициента происходит при помощи определения

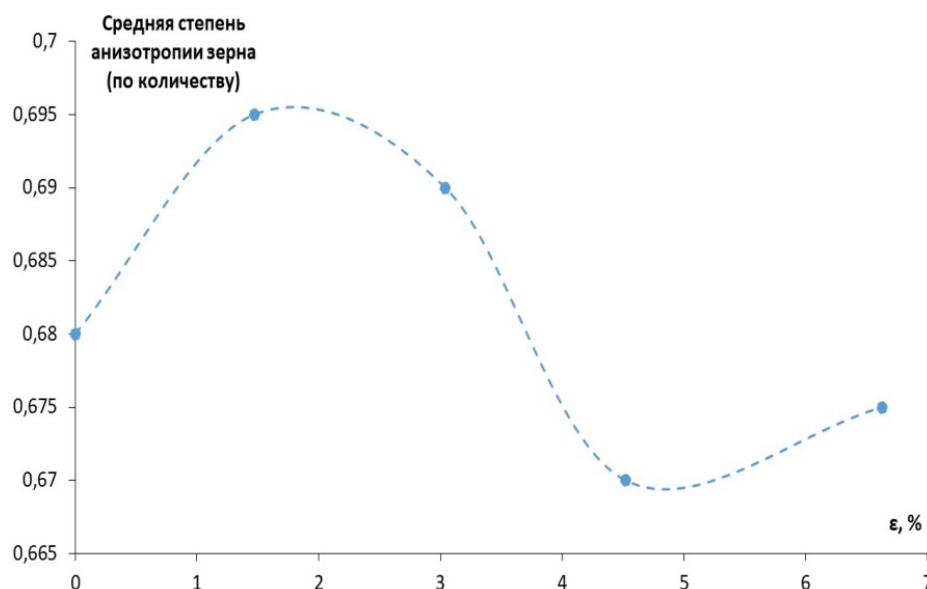


Рис. 9. Зависимость средней степени анизотропии зерна (по количеству) от величины остаточной деформации исследуемых образцов

Fig. 9. Dependence of the average degree of grain anisotropy (by number) on the value of residual strain of the specimens being studied

малых отклонений, наблюдаемых между исследуемыми параметрами:

$$N = \frac{|Y_{\max} - Y_i|}{\Delta X_i} \frac{X_i}{Y_i}, \quad (2)$$

где X_i – значение величины скорости коррозии; Y_i – значение величины внутренних остаточных напряжений; ΔX_i – приращение величины скорости коррозии; Y_{\max} – максимальная величина внутренних остаточных напряжений.

Коэффициент влияния внутренних напряжений определялся из центральной области экспериментальной зависимости по формуле (2). В итоге мы получили, что коэффициент влияния величины внутренних напряжений на скорость коррозии равен 0,72.

Выводы

1. При анализе результатов установлено, что начальное состояние материала оказывает прямое влияние на протекание коррозионного процесса в агрессивной среде. Иллюстрация данного эффекта проведена на примере деформации конструкционной стали Ст3 и изменения скорости ее коррозии в 5%-м растворе соляной кислоты.

2. Обнаружено, что при повышении степени пластической деформации вдоль направления проката происходит увеличение величины

внутренних напряжений. Величина внутренних напряжений подчиняется линейной корреляционной зависимости от величины остаточной деформации материала с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,98$.

3. При повышении степени пластической деформации происходит неоднозначное изменение величины анизотропии зерна, что связано с внутренними эффектами протекающих в структуре материала процессов при пластической деформации, такими как скольжение кристаллической решетки в направлениях $\{110\} \langle 111 \rangle$ и возникновение обратных остаточных внутренних напряжений из-за наличия в структуре стали включений.

4. Величина внутренних остаточных напряжений и скорости коррозии материала имеют прямую линейную связь, которая описывается регрессионным уравнением линейного типа с $R^2 \approx 0,92$. При этом коэффициент влияния величины внутренних напряжений на скорость коррозии равен 0,72, что доказывает наличие взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами.

Список литературы

1. Влияние напряженного-деформированного состояния металла трубопровода на скорость развития «ручейковой» коррозии / И.В. Жуйков, Д.В. Гареев,



Г.Г. Попов, В.И. Болобов // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: III Всероссийская конференция: сборник научных трудов. – СПб., 2020. – С. 1364–1370.

2. Зайнуллин Р.С., Зайнуллина А.Р. Взаимосвязь скорости коррозии и напряженно-деформированного состояния стали // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения. – Уфа, 2016. – Вып. 5 (10). – С. 347–353.

3. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.

4. Зерный Ю.В. Основы точности и управления качеством в приборостроении: учебное пособие. – М.: Моск. гос. акад. приборостроения и информатики, 2003. – 170 с.

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

6. ГОСТ 9.008–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 17 с.

7. Материаловедение: учебное пособие / под ред. А.Г. Багинского; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 104 с.

8. Роль неметаллических включений и микроструктуры в процессе локальной коррозии углеродистых и низколегированных сталей / И.И. Реформатская, И.Г. Родионова, Ю.А. Бейлин, Л.А. Нисельсон, А.Н. Подобаев // Защита металлов. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 498–504.

9. Родионова И.Г., Бакланова О.Н., Зайцев А.И. О роли неметаллических включений в ускорении процессов локальной коррозии нефтепромысловых трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей // Металлы. – 2004. – № 5. – С. 13–19.

10. Определение взаимосвязи фактора разнотекстности 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.

11. 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.

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. Влияние зернограницных сегрегаций на температуры мартенситного превращения в бикристаллах NiTi / Р.И. Бабишева, А.С. Семенов, С.В. Дмитриев, К. Жоу // Письма о материалах. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 162–167. – DOI: 10.22226/2410-3535-2019-2-162-167. – На англ. яз.

14. 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 (16). – P. 2048–2078. – DOI: 10.1080/14786435.2012.662601.

15. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain sizes using X-ray diffractometry method / R. Sokolov, V. Novikov, A. Venedictov, K. Muratov // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19 (5). – P. 2584–2585. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015.

16. Влияние термической обработки на образование соединения MnS в низкоуглеродистой конструкционной стали 09Г2С / Р.А. Соколов, В.Ф. Новиков, И.М. Ковенский, К.Р. Муратов, А.Н. Венедиктов, Л.З. Чаугарова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 113–126. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-113-126.

17. Abuku S. Magnetism studies of residual stress in iron and steel induced by uniaxial deformation // Japanese Journal of Applied Physics. – 1977. – Vol. 16 (7). – P. 1161–1170. – DOI: 10.1143/JJAP.16.1161.

18. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel / A.N. Stashkov, E.A. Schapova, A.P. Nichipuruk, A.V. Korolev // NDT & E International. – 2021. – Vol. 118. – P. 102398. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398.

19. Modelling the plastic anisotropy of aluminum alloy 3103 sheets by polycrystal plasticity / K. Zhang, B. Holmedal, O.S. Hopperstad, S. Dumoulin // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 22 (7). – P. 075015. – DOI: 10.1088/0965-0393/22/7/075015.

20. Zhao Q., Holmedal B., Li Y. Influence of dispersoids on microstructure evolution and work hardening of aluminium alloys during tension and cold rolling // Philosophical Magazine. – 2013. – Vol. 93 (22). – P. 2995–3011. – DOI: 10.1080/14786435.2013.794315.

21. Holmedal B., Houtte P.V., An Y. A crystal plasticity model for strain-path changes in metals // International Journal of Plasticity. – 2008. – Vol. 24 (8). – P. 1360–1379.

22. Juul Jensen D., Hansen N. Flow stress anisotropy in aluminium // Acta Metallurgica et Materialia. – 1990. –

Vol. 38 (8). – P. 1369–1380. – DOI: 10.1016/0956-7151(90)90105-P.

23. Extension of homogeneous anisotropic hardening model to cross-loading with latent effects / F. Barlat, J. Ha, J.J. Grácio, M.-G. Lee, E.F. Rauch, G. Vincze // International Journal of Plasticity. – 2013. – Vol. 46. – P. 130–142. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2012.07.002.

24. Веттегрень В.И., Рахимов С.Ш., Светлов В.Н. Динамика нанодфектов на поверхности на-

груженного золота // Физика твердого тела. – 1998. – Т. 40, № 12. – С. 2180–2183.

25. Кулеев В.Г., Царькова Т.П. Особенности зависимости коэрцитивной силы сталей от упругих растягивающих напряжений после пластических деформаций и термообработки // Физика металлов и материаловедение. – 2007. – Т. 104, № 5. – С. 479–486.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 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



Influence of internal stresses on the intensity of corrosion processes in structural steel

Roman Sokolov^{a, *}, Kamil Muratov^b, Anatolii Venediktov^c, Rasul Mamadaliev^d

Tyumen Industrial University, 38 Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>,  falcon.rs@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>,  muratows@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0002-6899-4297>,  annatoliy@gmail.com; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-0813-0961>,  mamadalievra@tyuiu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 August 2023

Revised: 21 August 2023

Accepted: 09 September 2023

Available online: 15 December 2023

Keywords:

Residual internal stresses

Microstructure

Degree of grain anisotropy

Structural steel

Residual strain

Corrosion rate

ABSTRACT

Introduction. The behavior of metal in a corrosive environment can be ambiguous, which is due to the peculiarities of the corrosion process. Both external and internal factors influence the corrosion process. External factors are determined by temperature, humidity, type of corrosive medium, etc., while internal factors depend on the parameters of the system (material): the presence of inclusions, phase composition, structure, and the magnitude of internal residual stresses. Internal factors ambiguously affect the behavior of the material in a certain aggressive medium, which ultimately affects the time of corrosion damage of the material and, as a consequence, the time of operation of objects made of this material. Therefore, differentiation of the influence of various internal factors on the rate of corrosion process in an aggressive environment is a priority area of research. **The purpose** of the present work is to consider the influence of the magnitude of internal residual stresses on the rate of corrosion process in an aggressive medium – 5 % sulfuric acid solution. **The object of research** conducted in the work is sheet rolled steel St3 as received after different magnitude of plastic deformation, from which the specimens under study were made. **The methods of investigation:** microstructural study of deformed specimens was carried out on optical microscope *Olympus GX53*; software *SLAMS 800* was used to compare the structure of the obtained material with the atlas of microstructures, determine the score of grain structure, determine the anisotropy of the structure after deformation of the material; X-ray diffractometer *DRON-7* was used to register diffraction patterns and determine internal stresses; laboratory scales *SHIMADZU UW620h* was used to measure the mass of the specimens under study; tensile strength of the material's specimens was measured. **Results and Discussion.** The obtained results show that the plastic deformation of the material in the rolling direction has an ambiguous effect on the structure anisotropy. When the degree of plastic deformation increases, there is an ambiguous change in the grain anisotropy value, which is associated with the internal effects of the processes occurring in the material structure during plastic deformation, such as: sliding of the crystal lattice in the {111} <110> directions; the occurrence of reverse residual internal stresses due to the presence of inclusions in the steel structure. However, the degree of plastic deformation correlates quite well with the magnitude of internal residual stresses. The increase in the magnitude of internal residual stresses leads to an increase in the corrosion rate of structural steel St3 in 5 % hydrochloric acid solution. The obtained dependence is described by a linear equation with a high coefficient of determination, which indicates that there is a strong relationship between the magnitude of internal residual stresses and the rate of corrosion of the material. At the same time, the coefficient of influence of internal stresses on the corrosion rate is equal to 0.72, which additionally proves the existence of interrelation between the considered parameters.

For citation: Sokolov R.A., Muratov K.R., Venediktov A.N., Mamadaliev R.A. Influence of internal stresses on the intensity of corrosion processes in structural steel. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 167–179. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-167-179. (In Russian).

References

1. Zhuikov I.V., Gareev D.V., Popov G.G., Bolobov V.I. [Influence of the stressed-deformed state of the pipeline metal on the rate of formation of grooving corrosion]. *Sovremennye obrazovatel'nye tekhnologii v podgotovke spetsialistov dlya mineral'no-syr'evogo kompleksa*: III Vserossiiskaya konferentsiya [Proceedings 3rd

* Corresponding author

Sokolov Roman A., Post-graduate Student, Assistant
 Tyumen Industrial University,
 38 Volodarskogo str.,
 625000, Tyumen, Russian Federation
 Tel.: +7 (919) 925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru

All-Russian Conference “Modern educational technologies in training specialists for the mineral resource complex”]. St. Petersburg, 2020, pp. 1364–1370. (In Russian).

2. Zainyllin R.S., Zainyllina A.R. Vzaimosvyaz' skorosti korrozii i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stali [Relationship of corrosion rate and tensions strain state of steel]. *Neftegazovye tekhnologii i novye materialy. Problemy i resheniya* [Proceedings of scientific papers “Oil and Gas Technologies and New Materials. Problems and solutions”]. Ufa, 2016, iss. 5 (10), pp. 347–353.

3. Gorelik S.S., Rastorguev L.N., Skakov Yu.A. *Rentgenograficheskii i elektronnoopticheskii analiz* [X-ray and electron optical analysis]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 366 p.

4. Zernii Yu.V. *Osnovy tochnosti i upravleniya kachestvom v priborostroenii* [Fundamentals of accuracy and quality management in instrumentation]. Moscow, Moscow State Academy of Instrument Engineering and Computer Science Publ., 2003. 170 p.

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

6. State Standard 9.008–85. *Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion resistance indices*. Moscow, Standards Publ., 2004. 17 p. (In Russian).

7. Baginskii A.G., ed. *Materialovedenie* [Materials science]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2015. 104 p.

8. Reformatskaya I.I., Rodionova I.G., Beilin Yu.A., Nisel'son L.A., Podobaev A.N. Rol' nemetallicheskih vkl'yuchenii i mikrostrukturny v protsesse lokal'noi korrozii uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley [The effect of nonmetal inclusions and microstructure on local corrosion of carbon and low-alloyed steels]. *Zashchita metallov = Protection of Metals*, 2004, vol. 40, no. 5, pp. 498–504. (In Russian).

9. Rodionova I.G., Baklanova O.N., Zaitsev A.I. O roli nemetallicheskih vkl'yuchenii v uskorenii protsessov lokal'noi korrozii neftepromyslovyykh truboprovodov iz uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley [On the role of nonmetallic inclusions in the acceleration of local corrosion of oil-field pipelines made of carbon and low-alloy steels]. *Metally = Russian Metallurgy (Metally)*, 2004, no. 5, pp. 13–19. (In Russian).

10. Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Opredelenie vzaimosvyazi faktora raznoznernosti 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.

11. Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Otsenka vliyaniya dispersnosti struktury stali na magnitnye i mekhanicheskie svoystva [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.

12. Ueji R., Tsuchida N., Terada D., Tsuji N., Tanaka Yu., Takemura A., Kunishige K. Tensile properties and twinning 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. Babicheva R.I., Semenov A.S., Dmitriev S.V., Zhou K. Effect of grain boundary segregations on martensitic transformation temperatures in NiTi bi-crystals. *Letters on Materials*, 2019, vol. 9 (2), pp. 162–167. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-2-162-167.

14. Li M., Kirk M.A., Baldo P.M., Xu D., Wirth B.D. Investigation of the evolution of defects by the TEM method with ion irradiation in situ and coordinated modeling. *Philosophical Magazine*, 2012, vol. 92 (16), pp. 2048–2078. DOI: 10.1080/14786435.2012.662601.

15. Sokolov R.A., Novikov V.F., Venediktov A.N., Muratov K.R. 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 (5), pp. 2584–2585. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015.

16. Sokolov R.A., Novikov V.F., Kovenskij I.M., Muratov K.R., Venediktov A.N., Chaugarova L.Z. Vliyanie termicheskoi obrabotki na obrazovanie soedineniya MnS v nizkouglerodistoi konstruktsionnoi stali 09G2S [The effect of heat treatment on the formation of MnS compound in low-carbon structural steel 09Mn2Si]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 113–126. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-113-126.

17. Abuku S. Magnetics studies of residual stress in iron and steel induced by uniaxial deformation. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1977, vol. 16 (7), pp. 1161–1170. DOI: 10.1143/JJAP.16.1161.



18. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel. *NDT & E International*, 2021, vol. 118, p. 102398. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398.
19. Zhang K., Holmedal B., Hopperstad O., Dumoulin S. Modelling the plastic anisotropy of aluminum alloy 3103 sheets by polycrystal plasticity. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 22 (7), p. 075015. DOI: 10.1088/0965-0393/22/7/075015.
20. Zhao Q., Holmedal B., Li Y. Influence of dispersoids on microstructure evolution and work hardening of aluminium alloys during tension and cold rolling. *Philosophical Magazine*, 2013, vol. 93 (22), pp. 2995–3011. DOI : 10.1080/14786435.2013.794315.
21. Holmedal B., Houtte P.V., An Y. A crystal plasticity model for strain-path changes in metals. *International Journal of Plasticity*, 2008, vol. 24 (8), pp. 1360–1379.
22. Juul Jensen D., Hansen N. Flow stress anisotropy in aluminium. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1990, vol. 38 (8), pp. 1369–1380. DOI: 10.1016/0956-7151(90)90105-P.
23. Barlat F., Ha J., Grácio J.J., Lee M.-G., Rauch E.F., Vincze G. Extension of homogeneous anisotropic hardening model to cross-loading with latent effects. *International Journal of Plasticity*, 2013, vol. 46, pp. 130–142.
24. Vettegren' V.I., Rakhimov S.Sh., Svetlov V.N. Dinamika nanodefektov na poverkhnosti nagruzhennogo zolota [Dynamics of nanodefects on a loaded gold surface]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 1998, vol. 40 (12), pp. 2180–2183. (In Russian).
25. Kuleev V.G., Tsar'kova T.P. Osobennosti zavisimosti koertsitivnoi sily stalei ot uprugikh rastyagivayushchikh napryazhenii posle plasticheskikh deformatsii i termoobrabotki [Effect of plastic deformations and heat treatment on the behavior of the coercive force under load]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2007, vol. 104 (5), pp. 479–486. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 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>).