



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Морфологические изменения поверхности деформированной конструкционной стали в коррозионно-активной среде

Роман Соколов^{а, *}, Камиль Муратов^б, Расул Мамадалиев^с

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

^а <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>, falcon.rs@mail.ru; ^б <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>, muratows@mail.ru;
^с <https://orcid.org/0000-0003-0813-0961>, mamadaliyeva@tyuiu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.24; 620.19

История статьи:

Поступила: 17 января 2025

Рецензирование: 14 февраля 2025

Принята к печати: 17 марта 2025

Доступно онлайн: 15 июня 2025

Ключевые слова:

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Внутренние факторы, включая фазовую гетерогенность, кристаллографическую текстуру, амплитуду остаточных напряжений и концентрацию неметаллических включений, оказывают нелинейное мультипараметрическое воздействие на коррозионную резистентность металлических систем в агрессивных средах. Такая сложность взаимодействий существенно затрудняет прогнозирование кинетики коррозионной деградации и оценку эксплуатационной долговечности металлоконструкций. Указанные параметры модулируют пространственное распределение коррозионных дефектов, их морфологию и глубину проникновения, что требует применения системного подхода для установления количественных корреляций. Для более точного понимания и учёта влияния внутренних факторов на коррозионный процесс необходимо проводить комплексные исследования и анализ. Использование математических методов обработки при анализе влияния позволит выявить более сильные закономерности применительно к процессу коррозионного разрушения. Это позволит разработать методы и подходы для оптимизации проектирования, производства и эксплуатации металлических конструкций и изделий, а также повысить их надёжность и долговечность. **Цель работы:** разработка многокритериальной модели, связывающей глубину коррозионных повреждений (интегральный показатель агрессивности среды) с микроструктурными, механическими и топографическими характеристиками низкоуглеродистой стали Ст3. Объектом исследования являются образцы из листового проката с варьируемой степенью остаточной пластической деформации ($\epsilon = 0-7\%$). **Методы исследования.** Микроструктурный анализ проводили с использованием оптической микроскопии (Olympus GX53) и сканирующей электронной микроскопии (JEOL 6008A) для оценки размера зерна, текстуры и дислокационной плотности. Количественную морфологию коррозионных повреждений осуществляли методом цифрового анализа изображений (программный комплекс AXALIT) с определением медианной глубины как ключевого параметра. Рентгенографический анализ остаточных напряжений применялся для построения тензорных полей напряжений. **Результаты и обсуждения.** Экспериментальные данные демонстрируют нелинейный рост медианной глубины коррозионных повреждений от степени деформации: при $\epsilon = 6,6\%$ наблюдается двукратное увеличение медианной глубины по сравнению с недеформированным состоянием. Многомерный регрессионный анализ выявил доминирующее влияние внутренних остаточных напряжений на кинетику процесса коррозионного разрушения ($R^2 = 0,89$). Разброс определяемых значений по внутренним напряжениям составляет ± 5 мкм. Обнаруженные закономерности связаны с поведением структуры материала при пластической деформации, которая в наибольшей степени происходит в направлениях $\{111\} \langle 110 \rangle$, что приводит к возникновению обратных остаточных внутренних напряжений. Медианная глубина коррозионных повреждений отражает скорость протекания коррозии. Метод группового учёта аргументов (МГУА) позволил синтезировать комплексный параметр, объединяющий различные параметры структуры стали. Полиномиальная аппроксимация зависимости медианной глубины коррозионных повреждений в 5% HCl от комплексного параметра демонстрирует высокую сходимость ($R^2 = 0,99$) при ошибке определения ± 1 мкм. Разработанная модель подтверждает, что остаточные напряжения являются одним из ключевых факторов, модулирующим коррозионную активность деформированной стали Ст3. Полученные результаты позволяют оптимизировать процессы холодной обработки стали для повышения коррозионной стойкости металлоконструкций. Дальнейшие исследования планируются сосредоточить в направлении влияния динамических нагрузок и температурных градиентов на эволюцию дислокационных субструктур.

Для цитирования: Соколов Р.А., Муратов К.Р., Мамадалиев Р.А. Морфологические изменения поверхности деформированной конструкционной стали в коррозионно-активной среде // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 174–188. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-174-188.

Введение

Коррозионное разрушение стали – сложный процесс, на который оказывают влияние как внешние, так и внутренние факторы. Например, структура материала определяет восприимчивость стали к процессу коррозии

*Адрес для переписки

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

[1–3]. Так, в работе [4] показано, что феррит и аустенит по сравнению с цементитом более электроотрицательны. Близкое расположение в структуре материала разных по электрическому потенциалу фаз приводит к возникновению микрогальванопар и интенсивному процессу разрушения в агрессивной среде.

Наличие дефектов в фазах ускоряет коррозионное разрушение материала. В структуре стали одна из фаз с высокой степенью дефектности – это мартенсит [5–7].

На процесс коррозионного разрушения также влияет однородность поверхности материала [7–11]. Особенно это важно для сталей с низким содержанием легирующих элементов [7, 12].

Исследования показали, что размер зёрен тоже влияет на коррозию [1, 13, 14]. Обычно это связано с тем, что границы между зёрнами притягивают дефекты кристаллической структуры и атомы включений [6–7, 15–16].

Питтинговая коррозия стали может наблюдаться при наличии примесных элементов в структуре [7, 17–19]. Примеси могут образовывать химические соединения, которые повышают активность материала в коррозионной среде [7, 20–21] из-за их электрохимической неоднородности [6].

В исследованиях [22, 25–26] продемонстрировано, что существует прямая зависимость между величиной внутренних остаточных напряжений и скоростью коррозии конструкционной стали. Внутренние напряжения могут достигать значений, превышающих предел текучести материала. Это приводит к пластической деформации и увеличению числа линейных дефектов в виде дислокаций [22, 25–29].

Остаточная деформация материала под воздействием внешних нагрузок усиливает анизотропность зёрен, что влияет на скорость коррозионного процесса [3, 22].

Представленные данные научных исследований подтверждают наличие полипараметрической зависимости коррозионных процессов от факторов экзогенного и эндогенного характера, включая кристаллическую структуру материала, степень фазовой гомогенности, морфологию поверхностного слоя, присутствие посторонних химических элементов в матрице сплава, а также дислокационные и гранично-дефектные образования. Многочисленные экспериментальные работы [23, 24] способствовали систематизации ключевых аспектов кинетики и термодинамики коррозионных явлений, что создаёт теоретическую базу для идентификации факторов, определяющих деградацию материала в условиях конкретной эксплуатационной среды.

Цель настоящей работы: разработка многокритериальной модели, связывающей глубину коррозионных повреждений (интегральный показатель агрессивности среды) с микроструктурными, механическими и топографическими

характеристиками низкоуглеродистой стали Ст3. Объектом исследования являются образцы из листового проката с варьируемой степенью остаточной пластической деформации ($\varepsilon = 0\text{--}7\%$).

Подобный подход можно использовать, опираясь на математические методы, позволяющие учесть влияние различных факторов (например, при помощи метода группового учета аргумента).

Задачи исследования

Изучить количественные взаимосвязи между глубиной коррозионных повреждений стали, величиной остаточных внутренних напряжений, анизотропией размеров зёрен и их количеством в агрессивной среде.

Исследовать влияние пластической деформации (не превышающей 7 %) на кинетику коррозионных процессов с акцентом на изменение глубины повреждений и роли остаточных напряжений.

Проанализировать возможные кристаллографические механизмы, определяющие корреляцию «глубина коррозии – остаточные напряжения».

Разработать физико-математическую модель, описывающую зависимость коррозионной кинетики от структурно-морфологических параметров, с учётом анизотропии деформации и дислокационной динамики при помощи метода группового учета аргументов.

Методика исследований

В работе исследовались образцы, изготовленные из листового проката стали Ст3, которая была использована в экспериментах в исходном состоянии. Изготовление образцов (4,0×70,0×25,0 мм) осуществлялось в перпендикулярном направлении относительно направления проката стали.

В работе [22] представлены данные о величине внутренних напряжений, степени анизотропии зерна и скорости коррозии исследуемых образцов в 5%-м растворе соляной кислоты, а также отражена методика определения этих параметров.

Исследуемые образцы имели разную величину остаточной деформации (см. таблицу).

Микроструктура исследуемых образцов получена на оптическом микроскопе и показана на рис. 1.

Исследование микроструктуры, выполненное в работе [22], позволило установить, что она

Номер образца и соответствующая величина
остаточной деформации

Sample number and corresponding residual
strain value

№ образца / Sample No.	1	2	3	4	5
ε , %	0	1,5	3,0	4,5	6,6

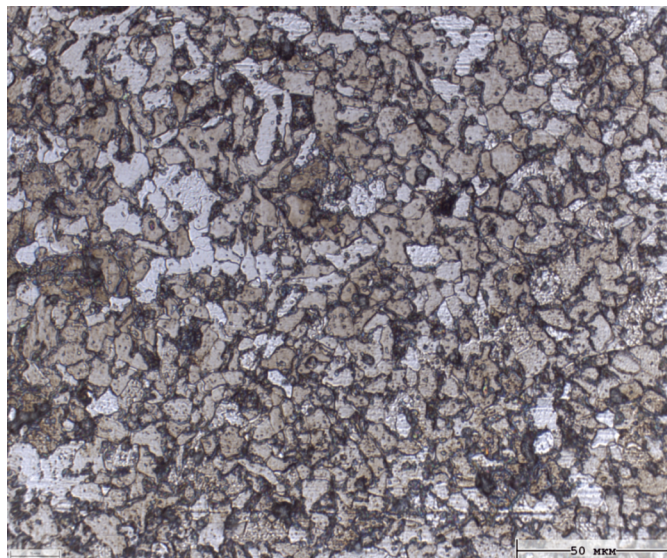


Рис. 1. Микроструктура недеформированного
образца стали Ст3

Fig. 1. Microstructure of undeformed St3 steel sample

состоит из феррито-перлитной смеси, в которой содержится 81,7 % феррита и 18,3 % перлита. Согласно ГОСТ 8233 балл структуры равен 8. При этом минимальный балл зерна составляет 8, максимальный – 13, а наиболее часто встречающийся на микрошлифе балл – 11.

Изучение коррозионных повреждений исследуемых образцов проводилось на растровом электронном микроскопе JEOL 6008A (рис. 2). Продукты коррозии материала перед проведением исследований удалялись с поверхности.

Определение геометрических параметров поверхности микрошлифа происходило на изображениях, полученных посредством растрового электронного микроскопа (в области сканирования) с помощью программного обеспечения AXALIT [30]. В программе были установлены значения распределения глубины повреждения. С помощью цветовой гаммы изображения определена глубина наблюдаемого повреждения. В AXALIT было проведено масштабирование изображения, что позволило более точно оце-

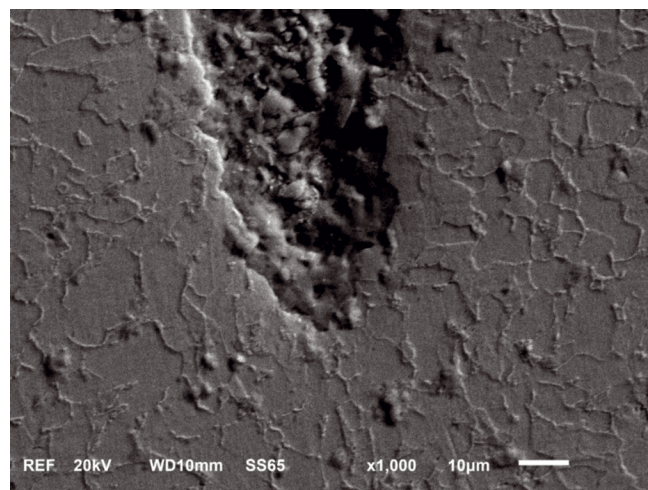


Рис. 2. Структура образца № 1 стали Ст3

Fig. 2. Structure of sample No. 1 of St3 steel

нивать результаты замеров. Измерение проводилось при помощи выделения контура дефекта, далее программа автоматически рассчитывала площадь (мкм^2). Изменение глубины осуществлялось вдоль прямой линии, при этом программное обеспечение считало более темные участки изображения как более глубокие. Полученный таким образом график представляет собой профилограмму поверхности вдоль выделенного направления. Построенные графики определяют зависимость глубины (мкм), определенной по яркости, от координаты положения линии на образце (мкм).

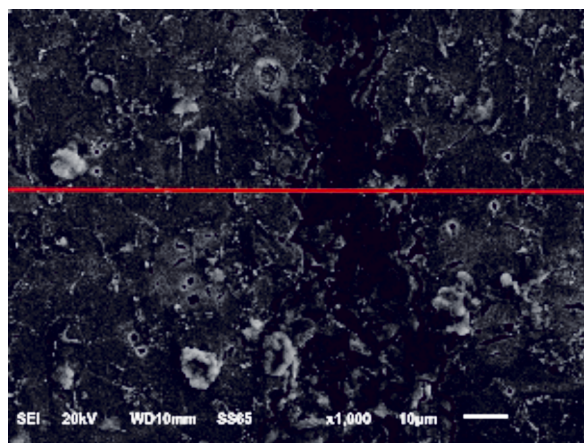
Методика вычисления глубины коррозионного повреждения заключается в следующем: значения глубины коррозионного разрушения, полученные при измерениях вдоль прямой линии (профилограмма) на базовой поверхности изображения, были использованы для нахождения медианного значения.

Результаты и их обсуждение

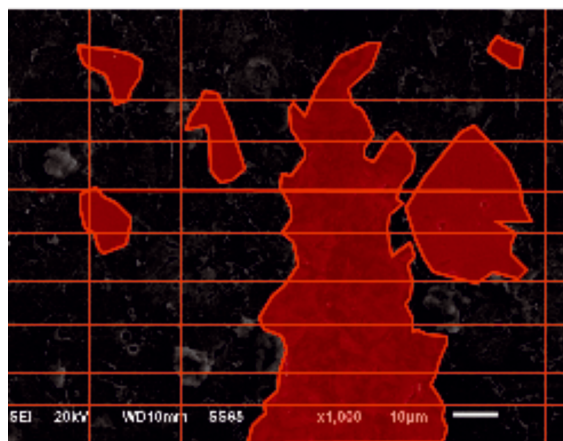
На рис. 3 представлен пример анализируемого в программе AXALIT изображения поверхности исследуемого образца № 2, которое было получено с помощью растрового электронного микроскопа.

Пример профилограммы приведен на рис. 4.

По полученным значениям глубины из нескольких измерений для каждого образца были определены медианные значения глубины коррозионных повреждений. Определение медианной глубины коррозионного повреждения



a



б

Рис. 3. Микроструктура образца № 2:

а – расположение линии построения профилограммы; б – выделенная область коррозионного повреждения

Fig. 3. Microstructure of sample No. 2:

а – profile line location; б – highlighted area of corrosion damage

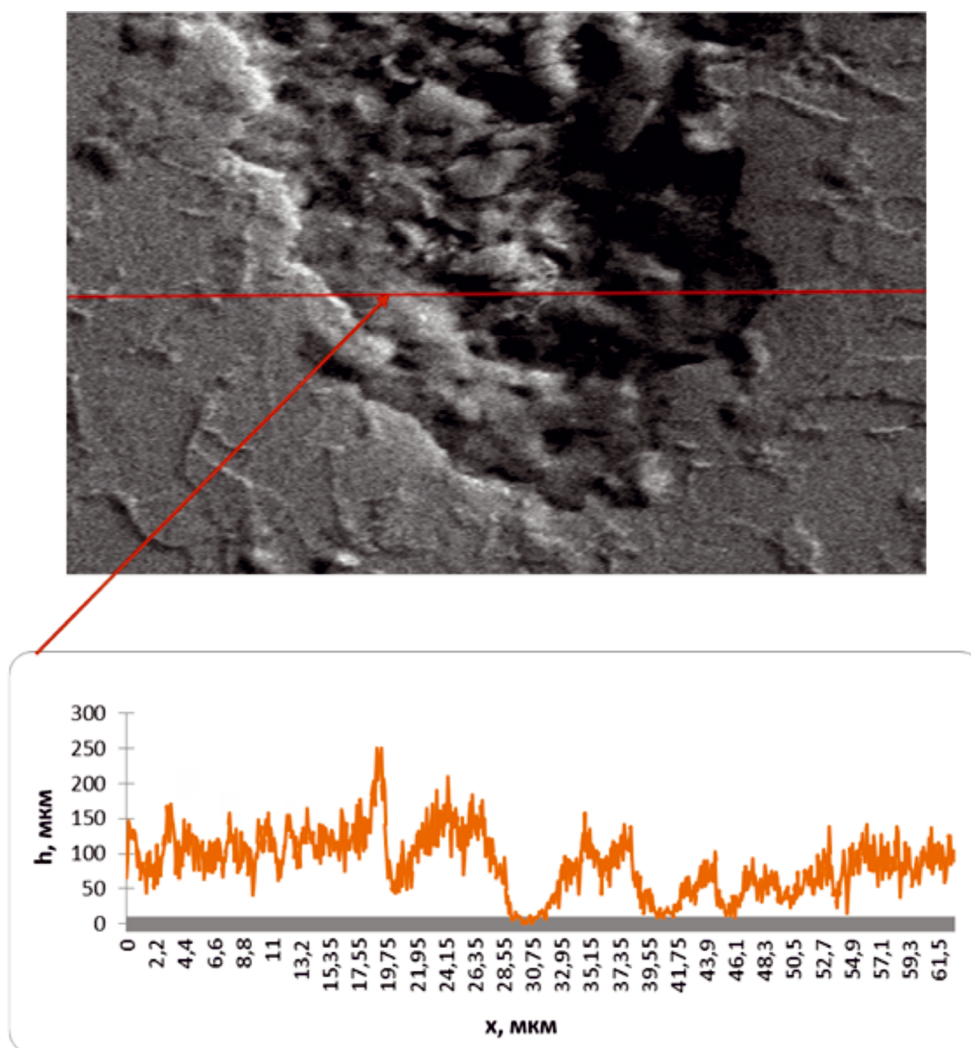


Рис. 4. Профилограмма, полученная на изображении микрошлифа образца № 1 в программе AXALIT

Fig. 4. Profilogram obtained from the micrograph of Sample No. 1 using AXALIT software

исследуемого материала производилось исходя из следующих соображений.

1. Поверхность образца имеет достаточно сильные перепады даже в местах, где не наблюдается наличия явных коррозионных повреждений (перепады могут достигать 45 мкм). Этот факт связан с тем, что рассматриваемый материал представляет собой многофазную систему, в которой различные компоненты по-разному реагируют на агрессивную среду. Кроме того, межзеренная граница является крайне негетерогенной из-за большого количества дефектов кристаллического строения.

2. Разрушение материала происходит неравномерно даже в очаге коррозионного разрушения, что связано с разной скоростью протекания процесса коррозии и более медленными диффузионными процессами в системе «материал – электролит».

3. Медианная величина показывает среднее значение в рассматриваемой выборке, а не усредняет полученные результаты измерений.

Зависимость медианного значения глубины коррозионного повреждения от величины остаточной пластической деформации представлена на рис. 5.

Из образцов после коррозионных испытаний дополнительно были изготовлены поперечные шлифы. Были сделаны микрофотографии, по-

казывающие расстояния от поверхности образца до верхней образующей в точках регистрации коррозионных повреждений (рис. 6), на которых происходило непосредственное измерение глубины коррозионных повреждений. Эти расстояния показаны на рис. 6 в виде синих линий. По полученным измерениям определялась медианная глубина коррозионных повреждений.

Сопоставление результатов измерения медианной глубины по микрофотографии поперечного шлифа и по фотографии поверхности в программе AXALIT представлено на рис. 7.

Как видно из рис. 7, результаты определения медианной глубины коррозионных повреждений при помощи программного обеспечения AXALIT являются удовлетворительными. Полученные зависимости изменения медианной глубины коррозионных повреждений от остаточной деформации материала в первом и втором случае носят схожий характер, т. е. можно говорить о совпадении полученных результатов. Результаты непосредственного измерения и полученные в программном обеспечении отличаются в 1,45 раза, что показано на рис. 8. Однако величины медианной глубины коррозионных повреждений, полученные двумя способами, находятся в прямой связи друг с другом, о чем говорит линейная зависимость, представленная на рис. 8. Коэффициент детерминации у полученной

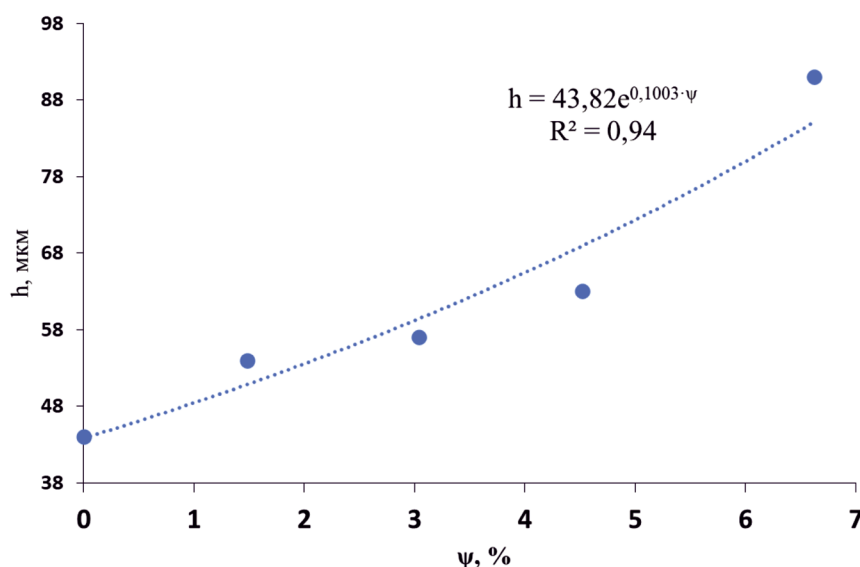


Рис. 5. Медианная глубина коррозионных повреждений при разной величине остаточной деформации материала

Fig. 5. Median depth of corrosion damage as a function of residual strain in the material

Рис. 6. Микрофотография поперечного шлифа, изготовленного из образца № 3 после проведения коррозионных испытаний, с указанием точек регистрации глубины коррозионных повреждений

Fig. 6. Micrograph of a cross-section prepared from Sample No. 3 after corrosion testing, showing the locations where corrosion damage depth was measured

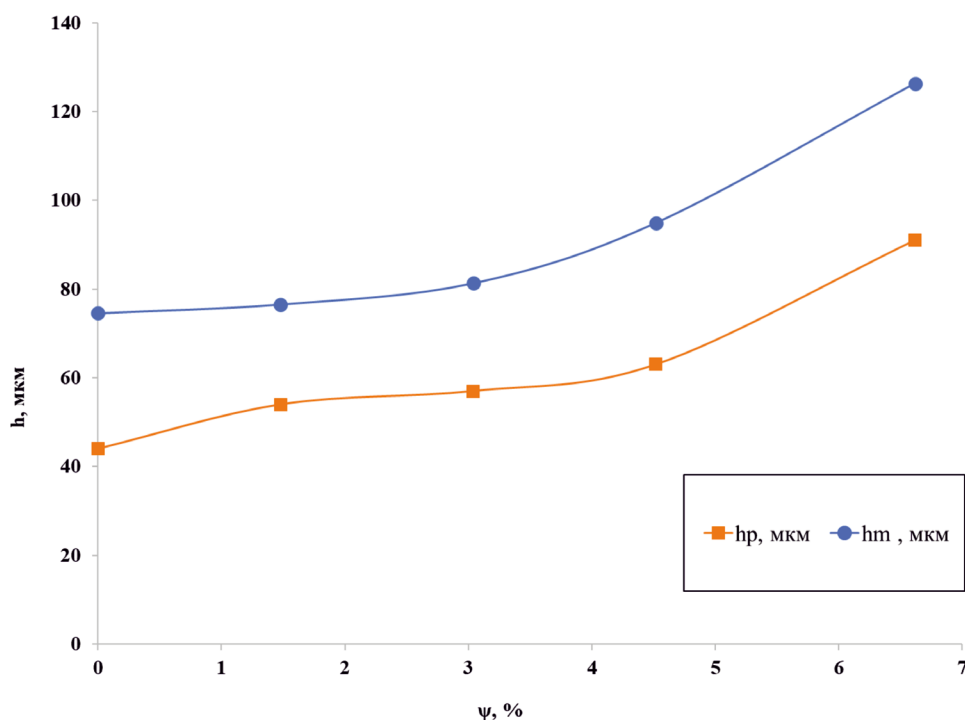
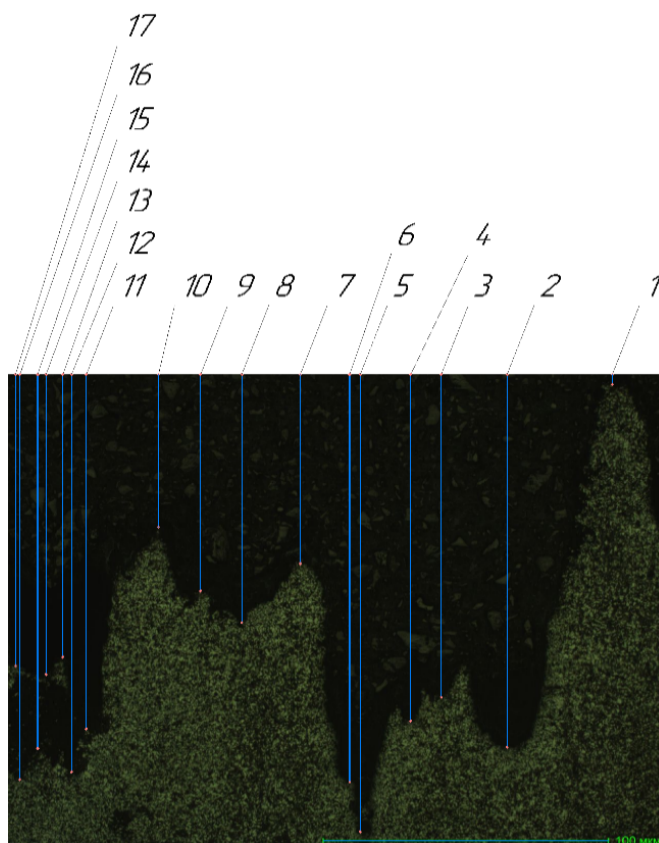


Рис. 7. Медианная глубина коррозионных повреждений при разной величине остаточной деформации материала:

h_p – результаты, полученные в программе AXALIT; h_m – результаты, полученные при изучении поперечного шлифа

Fig. 7. Median depth of corrosion damage at varying levels of residual strain:

h_p – results obtained using AXALIT software; h_m – results obtained from cross-sectional analysis

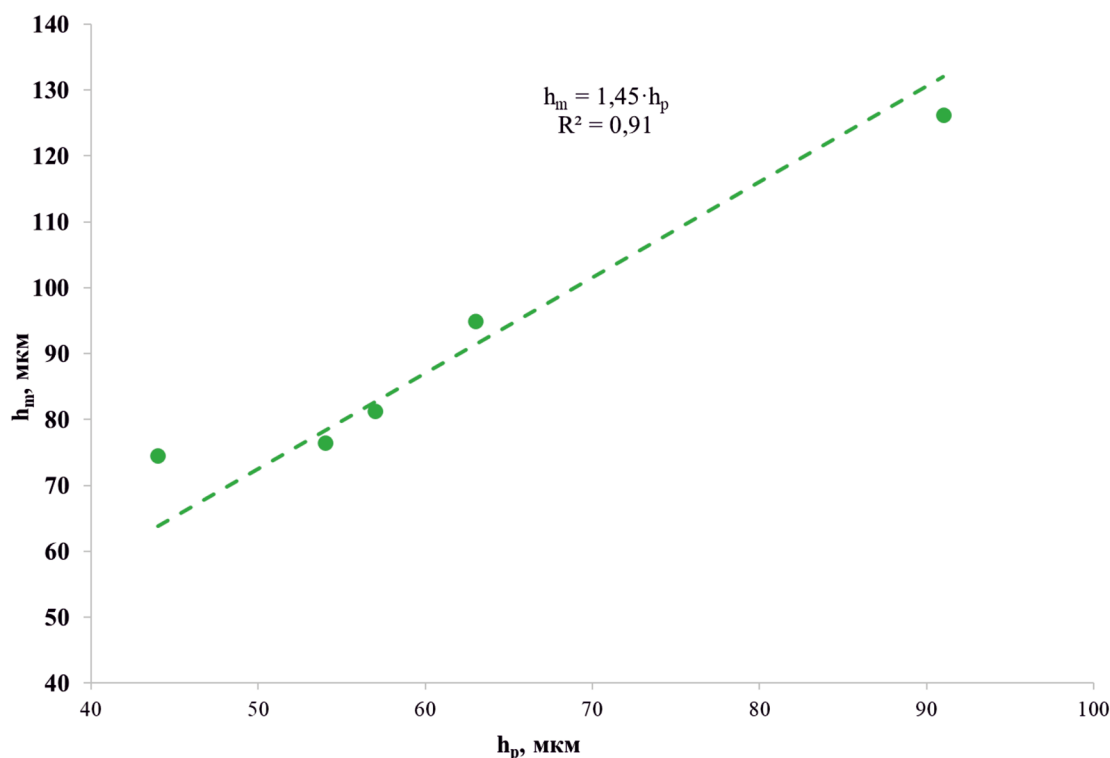


Рис. 8. Зависимость величины медианной глубины коррозионных повреждений h_m от h_p

Fig. 8. Relationship between median corrosion damage depth h_m and h_p

зависимости составляет 0,91, что еще раз говорит о совпадении полученных результатов.

Наблюдаемые на рис. 5, 7 и 8 данные говорят о том, что при пластической деформации происходит увеличение глубины проникновения коррозионного разрушения материала. Это связано с тем, что процесс разрушения материала начинается на микронеоднородностях поверхности, в качестве которых можно рассматривать дислокации и атомы химических элементов. Пластическая деформация материала приводит к росту плотности дислокаций [22, 25–27].

В процессе деформации материала дислокации движутся за счет процесса скольжения. В процессе движения дислокации сталкиваются с межзеренными границами (являющимися препятствиями). Накопление дислокаций происходит в области межзеренных границ.

Пластическая деформация приводит к возникновению новых дислокаций и увеличению их столкновения. В результате этого образуются скопления, неспособные перемещаться по кристаллу. В совокупности с диффундирующими в межзеренную границу атомами примесных элементов это приводит к интенсификации процесса коррозионного разрушения. Зоной начала

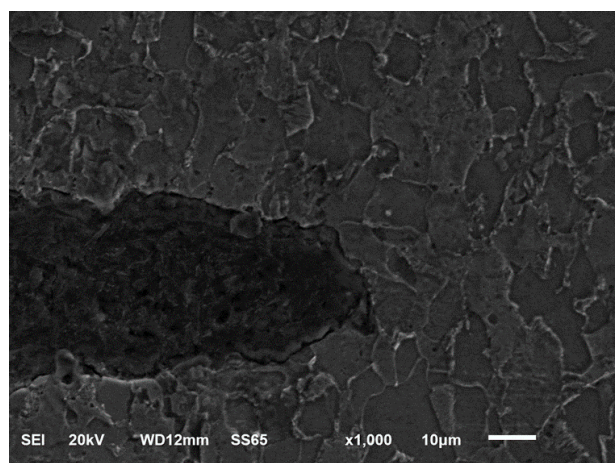
данного процесса является именно межзеренная граница (рис. 9).

Ограничение движения дислокаций и образования более обширного скопления приводит к упрочнению материала [20], что сказывается на форме зерна и его средней величине.

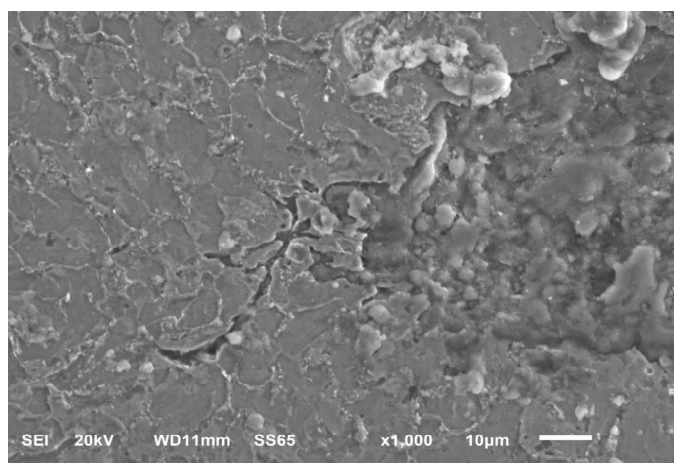
Средняя величина находится в прямой связи с количеством зерен в микроструктуре, а она влияет на протяженность межзеренных границ. Чем больше количество зерен, тем больше вероятность накопления дефектов кристаллического строения в этих областях и выше коррозионная восприимчивость материала. Однако при деформации изменяются и другие параметры рассматриваемой системы.

Форму зерна можно оценить по степени его анизотропии, которая увеличивается при пластической деформации материала [22]. Пластическая деформация в фазе с объемно-центрированной кубической решеткой чаще всего приводит к скольжению по кристаллографическим плоскостям и направлениям $\{110\}\langle 111 \rangle$ [31]. Это является причиной описанного процесса.

Из-за изменения формы зерна происходит уменьшение внутренних остаточных напряжений вследствие возникновения напряжений



a



б

Рис. 9. Микроструктура образцов № 4 (а) и № 5 (б) с выделенной областью начала коррозионного разрушения

Fig. 9. Microstructure of Sample No. 4 (a) and Sample No. 5 (б), showing the highlighted area of corrosion initiation

обратного знака [28]. Возникшая анизотропия текстуры и свойств материала сказывается на процессе коррозионного разрушения (рис. 10).

Взаимосвязь коррозионных процессов и внутренних напряжений, возникающих при пластической деформации, обусловлена модификацией дефектной субструктуры кристаллического материала, реализуемой посредством активации дислокационной динамики. Данный механизм предполагает координированное скольжение линейных дефектов кристаллической решётки по предпочтительным системам скольжения, определяемым кристаллографической конфигурацией с максимальной атомной плотностью упаковки, что минимизирует энергию активации сдвиговых процессов [21, 32, 33].

Пластическая деформация индуцирует направленную миграцию дислокаций, сопровождаемую их взаимодействием в объеме материала, включая процессы аннигиляции при встрече дислокаций противоположной векториальности, а также образование стабилизированных конфигураций (дислокационных стенок, сеток) [21, 32, 33].

Указанные структурные трансформации модулируют локальные электрохимические потенциалы, создавая зоны повышенной реакционной способности, что катализирует коррозионные процессы, как видно из рис. 11. Происходит это за счет следующих факторов: 1) формирования микрогальванических пар между деформированными и недеформированными участками;

2) интенсификации диффузии реагентов по дислокационным каналам; 3) накопления остаточных напряжений, снижающих энергетический барьер для реакций окисления.

Приведенные выше данные показывают, что глубина коррозионного разрушения зависит от множества внутренних факторов. Ее оценка по одной характеристике может дать как положительный, так и отрицательный результат.

Однако в оценке многозависимых параметров можно использовать методы, позволяющие комплексно определить влияние рассматриваемых величин на искомую. Одним из таких методов является метод группового учета аргументов (МГУА) [34–36]. Этот метод не осуществляет полный перебор всех возможных моделей, но при наличии большого объема исходных данных он позволяет найти оптимальное решение, представленное в виде комплексного параметра, который имеет наилучшую корреляцию с рассматриваемой величиной.

С помощью метода группового учета аргументов был определен комплексный параметр, тесно связанный с глубиной коррозионного повреждения изучаемого материала после пластической деформации. Этот параметр выражается следующей формулой:

$$P_2 = k_1 N + k_2 \sigma + k_3 \Delta,$$

где N – количество зерен; σ – величина внутренних остаточных напряжений; Δ – степень анизотропии.

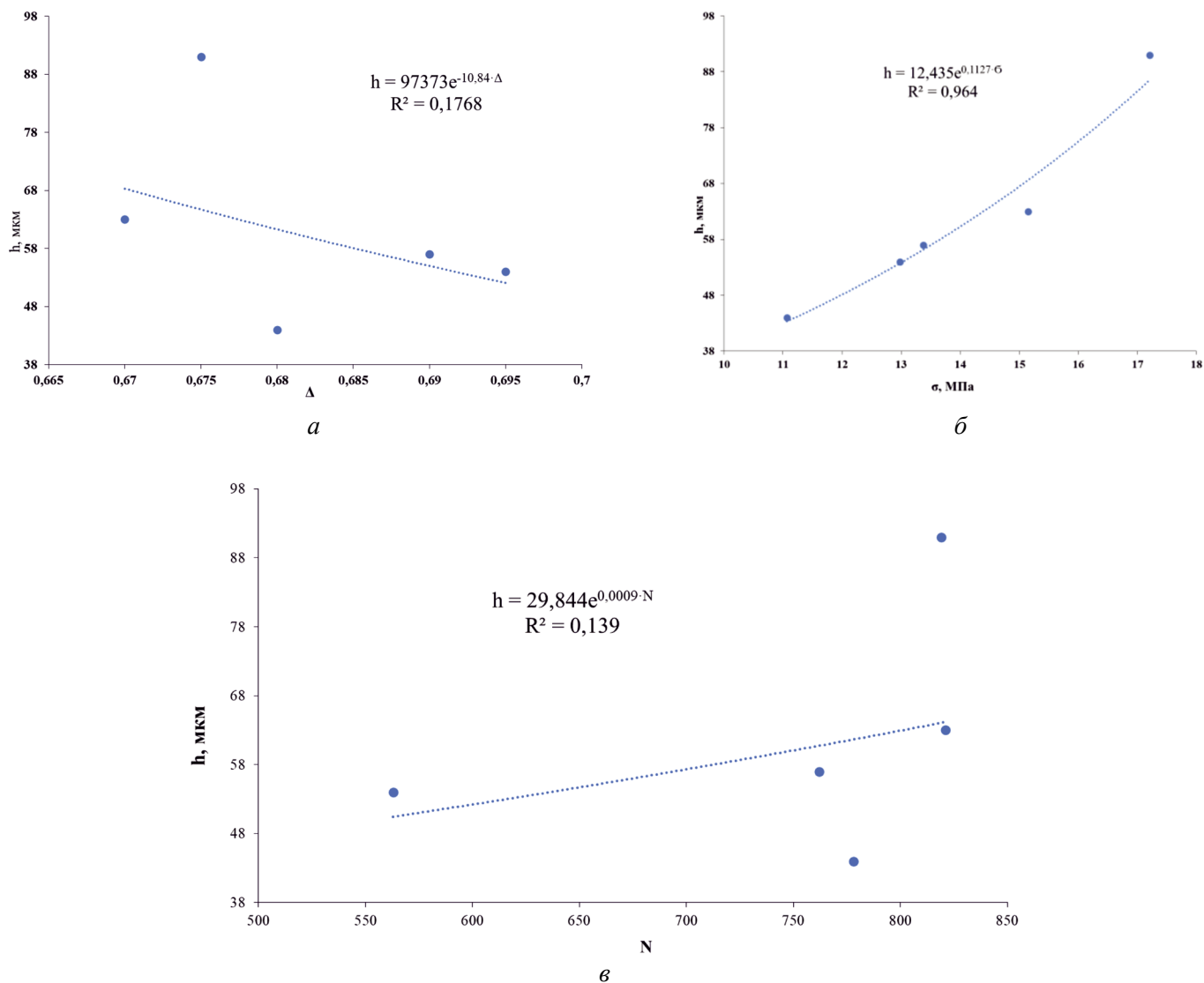


Рис. 10. Зависимость медианной глубины коррозионных повреждений от степени анизотропии зерна (а); величины внутренних остаточных напряжений (б); количества зерен в структуре материала (в)

Fig. 10. Dependence of median corrosion damage depth on:

a – degree of grain anisotropy; σ – value of residual stresses; N – grain count in the material structure

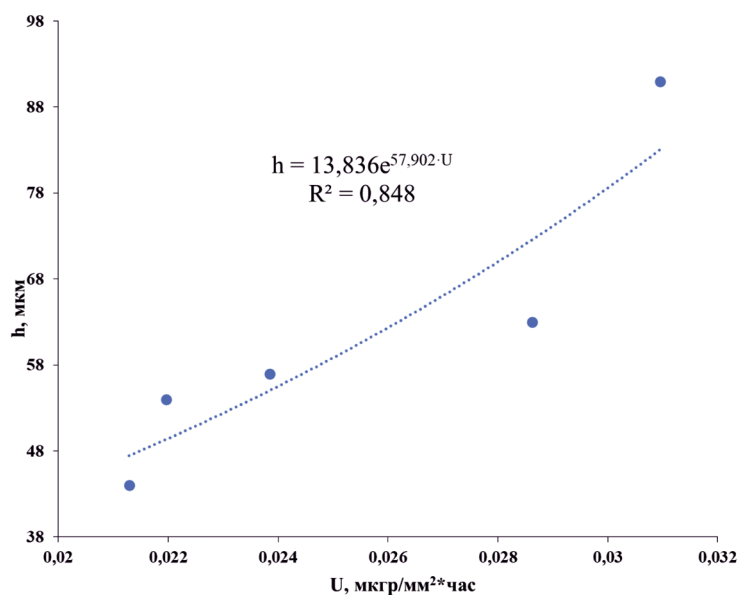


Рис. 11. Зависимость медианной глубины коррозионных повреждений от скорости коррозии образцов из стали Ст3 при разной величине остаточной деформации

Fig. 11. Dependence of median corrosion damage depth on corrosion rate of St3 steel samples at varying residual strain values

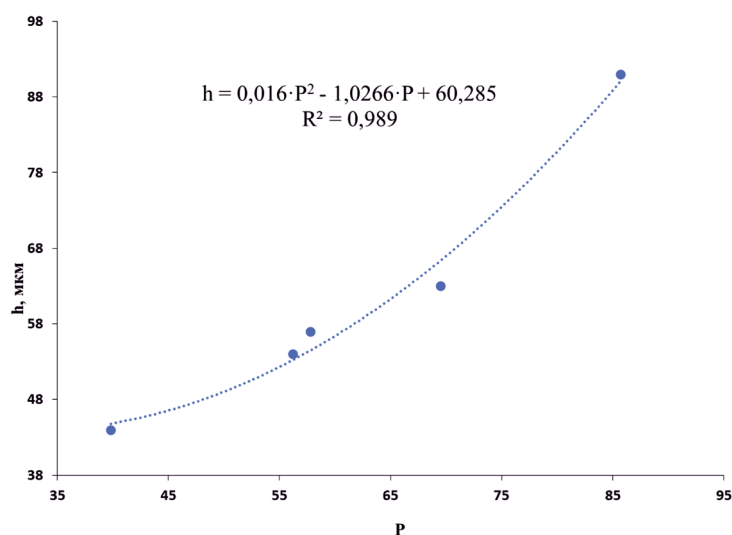
тропии зерна; k – коэффициент взаимного влияния рассматриваемых характеристик и глубины коррозионного разрушения.

Полученный комплексный критерий отражает влияние внутренних параметров материала на глубину коррозионных повреждений при пластической деформации (рис. 12). При рассмотрении отдельных параметров видно

достаточно сильный разброс, что даже при коэффициенте детерминации больше 0,9 затрудняет оценку интересующей величины. При применении комплексного параметра разброс значений медианной глубины, определенной по изображению, снижается до диапазона ± 1 мкм, а коэффициент детерминации стремится к единице.

Рис. 12. Зависимость медианной глубины коррозионных повреждений от комплексного параметра

Fig. 12. Dependence of median corrosion damage depth on the complex parameter



Выводы

1. Исследование результатов, полученных для стали Ст3 после выдержки в 5%-м растворе соляной кислоты, демонстрирует наличие прямой зависимости между глубиной коррозионных разрушений и внутренними остаточными напряжениями, а также между глубиной коррозионного повреждения и анизотропией размеров зёрен и общим числом зёрен.

2. Обнаружено, что при деформации исследуемого материала на 6,6 % медианная глубина коррозионного повреждения возрастает в два раза. Это согласуется с данными о росте скорости коррозии материала при увеличении величины пластической деформации вследствие возрастания величины внутренних остаточных напряжений.

3. Наибольшая статистически значимая корреляция ($R^2 > 0,85$) выявлена в системе «медианная глубина коррозионных повреждений – величина остаточных напряжений», где стандартное отклонение для последнего параметра не превышает ± 5 мкм при доверительном интервале 95 %. Данная взаимосвязь детерминируется кри-

сталлографической анизотропией пластической деформации, проявляющейся преимущественной активацией систем скольжения $\{111\}\langle 110 \rangle$ в материалах с ГЦК-решеткой. Селективная дислокационная подвижность вдоль указанных кристаллографических плоскостей связана с формированием градиентных полей остаточных напряжений сжатия и с локализованными релаксационными процессами, происходящими через образование дислокационных субструктур типа стенок и ячеек.

4. Метод группового учета аргументов (МГУА) позволяет определить комплексный параметр, который отражает медианную глубину коррозионных повреждений конструкционной стали Ст3 в 5%-м растворе соляной кислоты. Этот параметр учитывает величину остаточных внутренних напряжений, анизотропию зёрен и их количество. Он имеет высокую степень корреляции с медианной глубиной коррозионных повреждений. Полученная зависимость описывается полиномиальным уравнением второго порядка с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,99$ и разбросом определения медианной глубины ± 1 мкм.

Список литературы

1. Li Y., Wang F.G., Liu G. Grain size effect on the electrochemical corrosion behavior of surface nanocrystallized low-carbon steel // *Corrosion*. – 2004. – Vol. 60 (10). – P. 891–896. – DOI: 10.5006/1.3287822.
2. 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.
3. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Роль факторов формы зеренной структуры в электрохимической коррозии котельных труб, изготовленных из углеродистой стали 20 // *Практика противокоррозионной защиты*. – 2013. – № 3 (69). – С. 68–71.
4. Шур Я.С., Зайкова В.А. О влиянии напряжений на магнитную структуру кристаллов кремнистого железа // *Физика металлов и материаловедение*. – 1958. – Т. 6, вып. 3. – С. 545–555.
5. Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали: учебное пособие. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 495 с.
6. 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 (9). – P. 963–966. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.06.050.
7. 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.
8. 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.
9. Introduction to Corrosion Monitoring // *Metal Samples: Corrosion Monitoring Systems: website*. – URL: <https://www.alspi.com/introduction.htm> (accessed: 25.03.2025).
10. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
11. Intelligent coatings for corrosion control / ed. by A. Tiwari, L. Hihara, J. Rawlins. – Butterworth-Heinemann, 2014. – 746 p. – ISBN 9780124114678.
12. Nalli K. Corrosion and its mitigation in the oil and gas industry. An overview // *PetroMin Pipeliner Report*. – 2010. – January – March. – P. 10–16.
13. Определение взаимосвязи фактора разноразмерности 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.
14. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Роль факторов формы зеренной структуры в электрохимической коррозии котельных труб, изготовленных из углеродистой стали 20 // *Практика противокоррозионной защиты*. – 2013. – № 3 (69). – С. 68–71.
15. Effect of grain boundary segregations on martensitic transformation temperatures in NiTi bi-crystals / R. Babicheva, A. Semenov, S. Dmitriev, K. Zhou // *Письма о материалах*. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 162–167. – DOI: 10.22226/2410-3535-2019-2-162-167.
16. 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.
17. Мамадалиев Р.А., Бахматов П.В. Распределение легирующих элементов в многопроходных сварных швах хромоникелевой стали // *Материаловедение и термическая обработка металлов*. – 2023. – № 5 (815). – С. 55–60. – DOI: 10.30906/mitom.2023.5.55-60.
18. The role of nonmetallic inclusions in accelerating the local corrosion of metal products made of plain-carbon and low-alloy steels / I.G. Rodionova, O.N. Baklanova, G.A. Filippov, I.I. Reformatskaya, A.N. Podobayev, S.D. Zinchenko, M.V. Filatov, S.V. Efimov, V.Ya. Tishkov, A.V. Golovanov, V.I. Stolyarov, A.V. Emel'yanov, E.Ya. Kuznetsova // *Metallurgist*. – 2005. – Vol. 49 (3–4). – P. 125–130. – DOI: 10.1007/s11015-005-0065-3.
19. Vacancy defects in Fe: comparison between simulation and experiment / M.R. Gilbert, Z. Yao, M.A. Kirk, M.L. Jenkins, S.L. Dudarev // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – Vol. 386–388. – P. 36–40. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.
20. 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.
21. 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.
22. 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.

23. The corrosion behaviour of stainless steels and Ni-based alloys in nitrate salts under thermal cycling conditions in concentrated solar power plants / Q. Liu, R. Barker, C. Wang, J. Qian, A. Neville, F. Pessu // *Solar Energy*. – 2022. – Vol. 232. – P. 169–185. – DOI: 10.1016/j.solener.2021.12.072.

24. The formation of FeCO_3 and Fe_3O_4 on carbon steel and their protective capabilities against CO_2 corrosion at elevated temperature and pressure / Y. Hua, S. Xu, Y. Wang, W. Taleb, J. Sun, L. Zhang, R. Barker, A. Neville // *Corrosion Science*. – 2019. – Vol. 157. – P. 392–405. – DOI: 10.1016/j.corsci.2019.06.016.

25. 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.

26. 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.

27. Материаловедение: учебное пособие / под ред. А.Г. Багинского. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2015. – 104 с.

28. 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.

29. Фоминых Е.А. Совершенствование технологии производства конструкционной легированной

стали для крупных поковок: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2007. – 179 с.

30. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017664341 Российская Федерация. Программный комплекс съемки, анализа и контроля цифровых панорамных изображений микро и макроструктур различных материалов Axalit: № 2017660805: заявл. 25.10.2017: опубл. 27.12.2017 / Юсупов А.А., Рябков М.С.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

35. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Сравнительный анализ методов регрессии и метода группового учета аргументов при моделировании процессов переработки полезных ископаемых // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327, № 4. – С. 23–34. – EDN WBPEQB.

36. Аuzин А.А., Муравина О.М. Статистический анализ данных каротажа методом группового учета аргументов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2010. – № 2. – С. 219–224.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 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



Morphological changes of deformed structural steel surface in corrosive environment

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

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

^a <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>, falcon.rs@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>, muratows@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-0813-0961>, mamadalievra@tyuiu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 January 2025

Revised: 14 February 2025

Accepted: 17 March 2025

Available online: 15 June 2025

Keywords:

Residual stresses

Median depth

Degree of grain anisotropy

Structural steel

Residual strain

Corrosion rate

ABSTRACT

Introduction. Internal factors, including phase heterogeneity, crystallographic texture, residual stress amplitude and the concentration of non-metallic inclusions, exert a nonlinear, multi-parametric effect on the corrosion resistance of metallic systems in aggressive environments. This complex interaction significantly complicates the prediction of corrosion degradation kinetics and the assessment of the operational life of metal structures. These parameters modulate the spatial distribution of corrosion defects, their morphology and penetration depth, necessitating a systematic approach to establish quantitative correlations. To gain a more accurate understanding and account for the influence of internal factors on the corrosion process, comprehensive research and analysis are required. The use of mathematical processing methods in the analysis of influence will reveal stronger regularities applicable to the process of corrosion damage. This will enable the development of methods and approaches for optimizing the design, production and operation of metal structures and products, as well as improving their reliability and durability. **Purpose of work** is to develop a multi-criteria model linking the depth of corrosion damage (an integral indicator of environmental aggressiveness) with microstructural, mechanical, and topographic characteristics of low-carbon steel *Si3*. The objects of the study are samples from rolled sheet metal with varying degrees of residual plastic deformation ($\epsilon = 0-7\%$). **Methods of investigation.** Grain size, texture, and dislocation density were assessed through microstructural analysis using optical microscopy (*Olympus GX53*) and scanning electron microscopy (*JEOL 60084*). Quantitative morphometry of corrosion damage was performed using digital image analysis (*AXALIT* software), with median depth determined as a key parameter. X-ray diffraction analysis of residual stresses was implemented to construct tensor stress fields. **Results and discussion.** Experimental data demonstrates a non-linear increase of the median depth of corrosion damage with the degree of deformation: at $\epsilon = 6.6\%$, a twofold increase in the median depth is observed compared to the undeformed state. Multivariate regression analysis revealed the dominant influence of internal residual stresses on the kinetics of the corrosion damage process ($R^2 = 0.89$). The scatter of the determined values for internal stresses is $\pm 5 \mu\text{m}$. The observed regularities are associated with the behavior of the material structure during plastic deformation, which occurs most significantly in the $\{111\} \langle 110 \rangle$ directions, leading to the generation of reverse residual stresses. The median depth of corrosion damage reflects the rate of corrosion. The group method of data handling (*GMDH*) allowed for the synthesis a complex parameter combining various parameters of steel structure. Polynomial approximation of the dependence of the median depth of corrosion damage in $5\% \text{ HCl}$ on the complex parameter shows high convergence ($R^2 = 0.99$) with a determination error of $\pm 1 \mu\text{m}$. The developed model confirms that residual stresses are one of the key factors modulating the corrosion activity of deformed *Si3* steel. The results obtained allow for the optimization of cold treatment of steel to increase the corrosion resistance of metal structures. Further studies are planned to focus on the influence of dynamic loads and temperature gradients on the evolution of dislocation substructures.

For citation: Sokolov R.A., Muratov K.R., Mamadaliev R.A. Morphological changes of deformed structural steel surface in corrosive environment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 174–188. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-174-188. (In Russian).

References

1. Li Y., Wang F.G., Liu G. Grain size effect on the electrochemical corrosion behavior of surface nanocrystallized low-carbon steel. *Corrosion*, 2004, vol. 60 (10), pp. 891–896. DOI: 10.5006/1.3287822.
2. 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.
3. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Rol' faktorov formy zerennoi struktury v elektrokhimicheskoi korrozii kotel'nykh trub, izgotovlennykh iz uglerodistoi stali 20 [Role of grain structure form factors in electrochemical corrosion of boiler tubes made of carbon steel 20]. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity = Theory and Practice of Corrosion Protection*, 2013, no. 3 (69), pp. 68–71.

* Corresponding author

Sokolov Roman A., Ph.D. (Engineering)

Tyumen Industrial University,

38 Volodarskogo str.,

625000, Tyumen, Russian Federation

Tel.: +7 919 925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru



4. Shur Ya.S., Zaikova V.A. O vliyaniy napryazhenii na magnitnuyu strukturu kristallov kremnistogo zhelez [On the influence of stresses on the magnetic structure of siliceous iron crystals]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallurgy*, 1958, vol. 6, no. 3, pp. 545–555. (In Russian).
5. Smirnov M.A., Schastlivtsev V.M., Zhuravlev L.G. *Osnovy termicheskoi obrabotki stali* [Fundamentals of heat treatment of steel]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 1999. 495 p.
6. 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 (9), pp. 963–966. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.06.050.
7. 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.
8. 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.
9. Introduction to Corrosion Monitoring. *Metal Samples: Corrosion Monitoring Systems*. Website. Available at: <https://www.alspi.com/introduction.htm> (accessed 25.03.2025).
10. Zhuk N.P. *Kurs teorii korrozii i zashchity metallov* [The rate of corrosion and protection of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 472 p.
11. Tiwari A., Hihara L., Rawlins J., eds. *Intelligent coatings for corrosion control*. Butterworth-Heinemann, 2014. 746 p. ISBN 9780124114678.
12. Nalli K. Corrosion and its mitigation in the oil and gas industry. An overview. *PetroMin Pipeliner Report*, 2010, January – March, pp. 10–16.
13. Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Opredelenie vzaimosvyazi faktora raznozernistosti 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.
14. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Rol' faktorov formy zerennoi struktury v elektrokhimicheskoi korrozii kotel'nykh trub, izgotovlennykh iz uglerodistoi stali 20 [Role of grain structure form factors in electrochemical corrosion of boiler tubes made of carbon steel 20]. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity = Theory and Practice of Corrosion Protection*, 2013, no. 3 (69), pp. 68–71.
15. 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, no. 2, pp. 162–167. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-2-162-167.
16. 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.
17. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V. Raspredelenie legiruyushchikh elementov v mnogoprokhodnykh svarnykh shvakh khromonikelevoi stali [Distribution of alloying elements in multi-pass welds of chromium-nickel steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2023, no. 5 (815), pp. 55–60. DOI: 10.30906/mitom.2023.5.55-60. (In Russian).
18. Rodionova I.G., Baklanova O.N., Filippov G.A., Reformatskaya I.I., Podobaev A.N., Zinchenko S.D., Filatov M.V., Efimov S.V., Tishkov V.Ya., Golovanov A.V., Stolyarov V.I., Emel'yanov A.V., Kuznetsova E.Ya. The role of nonmetallic inclusions in accelerating the local corrosion of metal products made of plain-carbon and low-alloy steels. *Metallurgist*, 2005, vol. 49 (3–4), pp. 125–130. DOI: 10.1007/s11015-005-0065-3.
19. Gilbert M.R., Yao Z., Kirk M.A., Jenkins M.L., Dudarev S.L. Vacancy defects in Fe: comparison between simulation and experiment. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, vol. 386–388, pp. 36–40. DOI: 10.1016/j.jnucmat.
20. Reformatskaya I.I., Podobaev A.N., Rodionova I.G., Beilin Yu.A., Nisel'son L.A. Rol' nemetallicheskih vkl'yuchenii i mikrostruktury v protsesse lokal'noi korrozii uglerodistykh i nizkolegirovannykh stalei [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).
21. Rodionova I.G., Baklanova O.N., Zaitsev A.I. O roli nemetallicheskih vkl'yuchenii v uskorenii protsessov lokal'noi korrozii neftepromyslovykh truboprovodov iz uglerodistykh i nizkolegirovannykh stalei [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).

22. Sokolov R.A., Muratov K.R., Venediktov A.N., Mamadaliev R.A. Vliyanie vnutrennikh napryazhenii na intensivnost' korrozionnykh protsessov konstruktivnoi stali [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.

23. Liu Q., Barker R., Wang C., Qian J., Neville A., Pessu F. The corrosion behaviour of stainless steels and Ni-based alloys in nitrate salts under thermal cycling conditions in concentrated solar power plants. *Solar Energy*, 2022, vol. 232, pp. 169–185. – DOI: 10.1016/j.solener.2021.12.072.

24. Hua Y., Xu S., Wang Y., Taleb W., Sun J., Zhang L., Barker R., Neville A. The formation of FeCO_3 and Fe_3O_4 on carbon steel and their protective capabilities against CO_2 corrosion at elevated temperature and pressure. *Corrosion Science*, 2019, vol. 157, pp. 392–405. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.06.016.

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

26. 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.

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

28. 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.

29. Fominykh E.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva konstruktivnoi legirovannoi stali dlya krupnykh pokovok*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of the production technology of structural alloy steel for large forgings. PhD eng. sci. diss.]. South Ural State University. Chelyabinsk, 2007. 179 p.

30. Yusupov A.A., Ryabkov M.S. *Programmnyi kompleks s'emki, analiza i kontrolya tsifrovyykh panoramnykh izobrazhenii mikro i makrostruktur razlichnykh materialov Axalit* [Axalit software system for capturing, analyzing and controlling digital panoramic images of micro and macrostructures of various materials]. Russian Federation. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2017664341, 2017.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p.

35. Balasanyan S.Sh., Gevorgyan E.M. Sravnitel'nyi analiz metodov regressii i metoda gruppovogo ucheta argumentov pri modelirovani protsessov pererabotki poleznykh iskopaemykh [Comparative analysis of the regression methods and data group accounting method in modeling mineral processing]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 23–34.

36. Auzin A.A., Muravina O.M. Statisticheskii analiz dannykh karotazha metodom gruppovogo ucheta argumentov [The statistical analysis of the logging data with the using a method of the group account of arguments]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh state university. Series: Geology*, 2010, no. 2, pp. 219–224.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 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>).