Сибирский государственный индустриальный университет, Россия
Международная высшая школа Цинхуа в Шэньчжэне, Китай
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия
Алтайский государственный технический университет
имени И.И. Ползунова, Россия
Национальный исследовательский Томский
государственный университет, Россия
Научно-образовательный центр мирового уровня "Кузбасс", Россия
Университет науки и технологий Пекина, Китай
Хуачжунский университет науки и технологий, Китай
Университет Вэньчжоу, Китай
TGL Technology LTD, Великобритания

МАТЕРИАЛЫ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ
(МВП–2023)

13 – 14 Марта 2023

Труды
XII МЕЖДУНАРОДНОГО ОНЛАЙН СИМПОЗИУМА

Новокузнецк, 2023

УДК 669.017:539.2 (06)
ББК 22.9
М 39

Редакционная коллегия:
д-р физ.-мат. наук, профессор В.Е. Громов,
д-р. техн. наук, доцент Д.В. Загуляев,
д-р. техн. наук, доцент С.А. Невский,
аспирант кафедры ЕНД им. проф. В.М. Финкеля А.Н. Гостевская,
аспирант кафедры ЕНД им. проф. В.М. Финкеля А.А. Серебрякова

М 39 Материалы во внешних полях : труды XII Международного онлайн-симпозиума / под ред. В.Е. Громова, Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – 151 с.

Сборник трудов конференции содержит научные доклады в области физики конденсированных сред, основанные на научных достижениях, сгруппированные по разделам: перспективные технологии поверхностной упрочняющей обработки, проблемы прочности, пластичности материалов при внешнем энергетическом воздействии, проблемы эксплуатации материалов в экстремальных условиях, исследования высокоэнтропийных сплавов, методы получения и обработки материалов. В докладах представлены результаты, полученные экспериментальными методами и теоретическим моделированием. Актуальность выбранных направлений обосновывается ежегодно проводимыми международными конференциями, специализированными изданиями, международными проектами, посвященными поднимаемым темам.

Сборник трудов предназначен для специалистов по прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий и может быть использован научно-техническими работниками, аспирантами и студентами старших курсов.

УДК 669.017:539.2 (06)
ББК 22.9

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2023

Управление свойствами полупроводниковых гетероструктур и мдп-наноструктур с помощью внешних полей Н. Е. Капуткина 53
Влияние внешних и собственных электромагнитных полей на пластические свойства металлических проводников В.И. Сташенко, О.Б. Скворцов 55
Создание макетных образцов композиционной балки. подготовка образцов к серии предварительных механических испытаний Д.А. Дурасова 56
Features of the fracture surface of the AK5M2 alloy modified with Ti and irradiated by an electron beam A. A. Serebryakova, Yu. A. Shliarova, D.V. Zaguliaev, Yu.F. Ivanov 58
Влияние температуры на неоднородность пластической деформации Fe-Cr-Ni сплава С.А. Баранникова, П.В. Исхакова 59
Моделирование консервативного движения дислокационных порогов для оценки интенсивности генерации точечных дефектов Д.Н. Черепанов 61
Влияние свойств элемента деформационной среды на формирование различных типов полос суперлокализации пластической деформации Я.Д. Липатникова, Ю.В. Соловьева, И.Г. Вовнова, Л.А. Валуйская, Н.Н.Белов 63
Изменение элементного и фазового состава, дефектной субструктуры образцов системы «пленка (титан) / (ак5м2) подложка», подвергнутых облучению электронным пучком В.В. Шляров, Д. В. Загуляев, Ю.А. Шлярова, А.А. Серебрякова, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов 65
Ориентационная зависимость характеристик поверхностных упрочненных слоев в монокристаллах аустенитной нержавеющей стали после ионно-плазменного насыщения Е.А. Загибалова, А.С. Нифонтов, Е.Г. Астафурова 67
Многоцикловая усталость технически чистого титана в условиях магнито-полевых воздействий В.В. Шляров, К.В. Аксенова, А.А. Серебрякова, Д.В. Загуляев 74
Исследование микроструктуры и микротвердости al-zn-mg-cu сплава, полученного аддитивным способом В.К. Дробышев, Д.Н. Лабунский, И.А. Панченко, С.В. Коновалов 76
Секция 3. Проблемы эксплуатации материалов в экстремальных условиях 79
Собственные акустические колебания как возможный фактор стресс-коррозии на магистральном газопроводе А.Б. Арабей, И.В. Ряховских, Т.Ю. Истомина, Д.Е. Капуткин, Д.И. Преферансов, С.И. Погуляев, В.А. Степанова 83
Механизмы упрочнения рельсовой стали при сжатии К.В. Аксёнова, Е.С. Ващук, В.Е. Громов, Ю.Ф.Иванов 85
Взаимное влияние грунтового электролита и углеродистой стали в процессе биологической коррозии при воздействии ультразвуковых колебаний Д. Е. Капуткин, Т. Ю. Истомина, В.А. Степанова, Д.И. Преферансов 88
Внутренние напряжения и их источники в рельсовых сталях Н.А. Попова, В.Е. Громов, М.А. Порфирьев, Р.Е. Крюков, В.В. Шляров, А.А. Юрьев 89
Динамические механические нагрузки на проводящие элементы электромеханического оборудования, связанные с воздействием электрических и магнитных полей О.Б. Скворцов, В.И. Сташенко 90
Сопротивление ползучести модифицированного сплава tnm-b1 с глобулярной и ламеллярной структурой, полученного методом порошковой металлургии Г.М. Марков, П.А. Логинов, Е.А. Левашов 92
Структурно-фазовое состояние и свойства тонких пленок на основе in-sn-o, напыленных на кварцевые стекла методом магнетронного распыления металлической мишени из сплава индия и олова Р.Б. Турсунханова, В.П. Сергеев, М.П. Калашников, О.В. Сергеев, В.В. Нейфельд 93
Deformation of different ribbon amorphous alloys under cyclic loading and uniform heating A.D. Berezner, V.A. Fedorov 97
Прочностные, трибологические свойства и структурно-фазовые состояния рельсовых сталейМ.А. Порфирьев, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Шлярова, Р.Е. Крюков,

материалов». Москва. 25-27 октября 2022. Сборник тезисов. // М.: НИТУ «МИСиС». – 2022. – с. 75.

4. Ряховских И.В. Безопасная эксплуатация газопроводов на основе модели управления коррозионным растрескиванием под напряжением // Вести газовой науки: науч.-технический. сб. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2022. – № 1(50): Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением. – с. 17–30.

УДК 669.112:539.4:669.539.382

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ СЖАТИИ

К.В. Аксёнова[1], Е.С. Ващук[2], В.Е. Громов[1], Ю.Ф.Иванов[3]

[1]Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, e-mail: 19krestik91@mail.ru
[2]Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева
г. Прокопьевске, Россия, e-mail: vaschuk@bk.ru
[3]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Аннотация. Методами современного физического материаловедения исследована эволюция структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры рельсовой стали при деформации одноосным сжатием до степени 50 %. Выявлена фрагментация перлитных зерен, возрастающая с ростом степени деформации, и пластин цементита, размер фрагментов которого 15-20 нм слабо зависит от степени деформации. Показано, что основными механизмами упрочнения металла при степени деформации 50 % являются упрочнение некогерентными частицами и упругими внутренними полями напряжений. Используя принцип аддитивности, предполагающий независимое действие каждого из механизмов упрочнения, выполнена оценка зависимости общего предела текучести рельсовой стали от степени деформации при сжатии.

Ключевые слова: деформация сжатием, рельсовая сталь, структура, дислокационная субструктура, механизмы упрочнения, аддитивный предел текучести.

В настоящей работе проводили количественную оценку механизмов упрочнения металла рельсов при деформации сжатием. Исследовали дифференцированно термоупрочненные рельсы категории ДТ350, полученные из вакуумированной электростали Э76ХФ в соответствии с требованиями ТУ 0921-276-01124333–2021.

При испытании на сжатие образцы стали Э76ХФ не удалось довести до разрушения, поскольку они сплющились из-за того, что исследуемая сталь способна достаточно сильно деформироваться без разрушения. Деформация стали сопровождается фрагментацией перлитных зерен, усиливающейся по мере увеличения степени деформации и достигающей при $\varepsilon = 50$ % ≈0,4 объема исследуемой фольги. Фрагменты, формирующиеся в пластинах феррита, разделены малоугловыми границами. Установлено, что средние размеры фрагментов пластин феррита при увеличении степени деформации уменьшаются от 240 нм ($\varepsilon = 15$ %) до 200 нм ($\varepsilon = 50$ %). Выявлена фрагментация пластин цементита. Установлено, что размер фрагментов изменяется в пределах 15-20 нм и слабо зависит от степени деформации стали. Обнаружено разрушение пластин цементита, протекающее путем их растворения и разрезания подвижными дислокациями. Атомы углерода, перешедшие из кристаллической решетки цементита на дислокации, выносятся в межпластинчатое пространство и формируют частицы третичного цементита, размеры которых составляют 2-4 нм [1].

Выявлено формирование в процессе деформации стали неоднородной дислокационной субструктуры, обусловленное торможением дислокаций частицами цементита. Увеличение степени деформирования сопровождается снижением скалярной и избыточной плотности дислокаций, что может быть обусловлено уходом дислокации в малоугловые границы, а также

их аннигиляцией. Установлено, что источниками внутренних полей напряжений являются границы раздела зерен и колоний перлита, пластин цементита в зернах перлита, расположенные в объеме пластин феррита частицы второй фазы [2].

Основными вкладами в сопротивление деформированию являются [3-9]: σ_0 = 35 МПа – напряжение трения дислокаций в кристаллической решетке α-железа; $\sigma_{тв}$ – упрочнение твердого раствора на основе феррита атомами легирующих элементов; $\sigma_{перл}$ – упрочнение за счет перлита; $\sigma_л$ – упрочнение дислокациями «леса», которые перерезают скользящие дислокации; $\sigma_{ор}$ – упрочнение материала некогерентными частицами при обходе их дислокациями по механизму Орована; $\sigma_д$ – упрочнение внутренними дальнодействующими полями напряжений; $\sigma_с$ – субструктурное упрочнение.

Оценку твердорастворного упрочнения стали, обусловленного атомами углерода и другими легирующими элементами, осуществляли, используя эмпирическое выражение вида:

$$\sigma_{тв} = \sum_{i=1}^{n} C_i k_i, \quad (1)$$

где k_i – коэффициент упрочнения феррита, представляющий собой прирост прочности материала на пределе текучести при растворении в нем 1 мас.% легирующего элемента, значение которого для различных элементов определяется эмпирически; C_i – концентрация i-того элемента, растворенного в феррите, мас.%. Под i-тым элементом имеются ввиду элементы в количествах, имеющихся в этот момент в α-твердом растворе.

Упрочнение за счет перлитной составляющей определяли по соотношению [3]:

$$\sigma_{перл} = k_y (4{,}75r)^{-1/2} P_V, \quad (2)$$

где P_V – объемная доля перлита; r – расстояние между частицами Fe_3C; $k_y = 2 \cdot 10^{-2}$ Па·м$^{1/2}$ – коэффициент упрочнения феррита.

Напряжение, необходимое для поддержания пластической деформации, т. е. напряжение течения σ, необходимое для преодоления движущимися дислокациями (носителями деформации) сил взаимодействия с неподвижными дислокациями (дислокациями «леса»), связано со скалярной плотностью дислокаций следующим соотношением [3]:

$$\sigma_л = т\alpha Gb\sqrt{\rho}, \quad (3)$$

где m – ориентационный множитель (фактор Шмида); α – безразмерный коэффициент, меняющийся в пределах 0,05-0,60 в зависимости от типа дислокационного ансамбля (в настоящей работе принято α = 0,25, $m\alpha$ = 1); G – модуль сдвига материала матрицы (G = 80 ГПа); b – вектор Бюргерса дислокации (0,25 нм); ρ – среднее значение скалярной плотности дислокаций.

Упрочнение стали, учитывающее присутствие некогерентных частиц второй фазы, осуществляли, используя соотношение [5]:

$$\sigma_{ор} = B \frac{mGb}{2\pi(|r-R|)} \Phi \cdot \ln\left(\left|\frac{r-R}{2b}\right|\right), \quad (4)$$

где R – средний размер частиц; r – расстояние между центрами частиц; Φ – множитель, зависящий от типа дислокации (Φ = 1); B – параметр, учитывающий неравномерность распределения частиц в матрице (B = 0,85).

Деформация сопровождается формированием в стали внутренних полей напряжений. Величину пластической составляющей внутренних полей напряжений можно оценить, исходя из соотношения [4]:

$$\sigma_{пл} = m\alpha Gb\sqrt{\rho_{\pm}}, \quad (5)$$

Величину упругой составляющей внутренних полей напряжений оценивают, исходя из соотношения [4]:

$$\sigma_{упр} = m\alpha Gt\chi_{упр}, \quad (6)$$

где t – толщина фольги, принятая равной 200 нм; $\chi_{упр}$ – упругая составляющая кривизны-кручения кристаллической решетки.

Величина субструктурного упрочнения оценивалась по соотношению [7]:

$$\sigma_c = k_c \cdot d^{-1}, \quad (7)$$

где $k_c = 15 \cdot 10^{-4}$ Н/мм; d – размер фрагментов.

Общий предел текучести стали в первом приближении, основанном на принципе аддитивности, который предполагает независимое действие каждого из механизмов упрочнения материала, можно представить в виде линейной суммы вкладов отдельных механизмов упрочнения [3, 7 – 9]:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{тв} + \sigma_{перл} + \sigma_{ор} + \sigma_c + \sqrt{\left(\sigma_д^2 + \sigma_л^2\right)}. \quad (8)$$

Дислокационные механизмы, действующие внутри отдельного зерна локально и неоднородно, какими являются $\sigma_л$ и $\sigma_д$, оказываются разными по амплитуде, месту действия и физическому смыслу, поэтому их суммирование должно проводиться в квадратичном приближении.

Таким образом, прочность стали является величиной многофакторной и определяется совокупным действием ряда физических механизмов. Прочность металла рельсов зависит от степени деформации сжатием, а также резко увеличивается при больших степенях деформации. Основными механизмами упрочнения металла при больших степенях деформации являются упрочнение некогерентными частицами.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (проект СП-4517.2021.1).

Библиографический список

1. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Аксенова К.В., Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е., Ващук Е.С. Эволюция структуры рельсовой стали при сжатии // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 8. С. 9-14.

2. Аксенова К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ващук Е.С., Перегудов О.А. Эволюция структуры пластинчатого перлита рельсовой стали при деформации сжатием // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. № 10. С. 43-48.

3. Пикеринг Ф. Б. Физическое металловедение и обработка сталей. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.

4. Конева Н. А., Киселева С. Ф., Попова Н. А. Эволюция структуры и внутренние поля напряжений. Аустенитная сталь. – Saarbrucken: LAPLAMBERT Academic Publishing. – 2017. – 145 с.

5. Yao M.J., Welsch E., Ponge D., Haghighat S.M.H., Sandlöbes S., Choi P., Herbig M., Bleskov I., Hickel T., Lipinska-Chwalek M., Shantraj P., Scheu C., Zaefferer S., Gault B., Raabe D. Strengthening and strain hardening mechanisms in a precipitation-hardened high-Mn lightweight steel // Acta Materia. – 2017. – V. 140. – P. 258–273.

6. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Тихомирова Л.Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. – 280 с.

7. Беленький Б.З., Фарбер Б.М., Гольдштейн М.И. Оценки прочности малоуглеродистых низколегированных сталей по структурным данным // ФММ. – 1975. – Т. 39, № 3. – С. 403–409.

8. Sieurin H., Zander J., Sandström R. Modelling solid solution hardening in stainless steels // Mater. Sci. Eng. A. – 2006. – V. 415. – P. 66–71.

9. Прнка Т. Количественные соотношения между параметрами дисперсных выделений и механическими свойствами сталей // Металловедение и термическая обработка стали. – 1979. – № 7. – С. 3–8.