

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ СО РАН

ФИЗИЧЕСКАЯ МЕЗОМЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ.  
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ  
СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЗМЫ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Международная конференция

5–8 сентября 2022 г.  
Томск, Россия

Тезисы докладов

Новосибирск  
2022

УДК 539(063)+620.18(063)  
ББК В251я431+Ж37я431  
Ф503

Ф503 Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения : Тез. докл. Междунар. конф., 5-8 сентября 2022 г., Томск, Россия / Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2022. – 556 с.

ISBN 978-5-4437-1353-3

Издание содержит тезисы международной конференции «Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения». Физическая мезомеханика является научным направлением, в рамках которого материал представляется как иерархическая система взаимосвязанных структурных (масштабных) уровней. В сборнике отражены последние достижения в области развития принципов и методологии физической мезомеханики и результаты их применения к созданию перспективных материалов в интересах развития новых производственных технологий, освоения космического пространства, в том числе дальнего космоса, электроники, атомной энергетики, нефтегазового комплекса, медицины, транспорта и др.

Предназначено научным сотрудникам, инженерам, аспирантам и специалистам, занимающимся вопросами физической мезомеханики, разработки наноструктурных объемных и наноразмерных материалов, наноструктурированием поверхностных слоев, тонкими пленками и покрытиями, нанотехнологиями, компьютерным конструированием новых материалов и технологий их получения, технологиями локальной нестационарной металлургии и обработки материалов, неразрушающими методами контроля.

УДК 539(063)+620.18(063)  
ББК В251я431+Ж37я431

ISBN 978-5-4437-1353-3

© Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2022

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА ПРИ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ**<sup>1</sup>Аксёнова К.В., <sup>1</sup>Громов В.Е., <sup>2</sup>Иванов Ю.Ф., <sup>3</sup>Ващук Е.С.<sup>1</sup>*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк*<sup>2</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск*<sup>3</sup>*Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева, Прокопьевск*

Значительное увеличение интенсивности железнодорожного транспорта и его грузонапряженности в последние годы требует высокой эксплуатационной стойкости рельсов, изготавливаемых из перлитной стали. В исходном состоянии рельсы содержат около 70% перлита пластинчатой морфологии, деформация которого сопровождается сложной трансформацией феррита и цементита [1], обычно наблюдаемой методами просвечивающей электронной микроскопии. Основное внимание при этом уделяется деформационно индуцированному разрушению цементита [2, 3], приводящему к росту концентрации углерода в феррите и дополнительному механизму упрочнения. Целью настоящей работы являлся анализ преобразования дефектной субструктуры перлита пластинчатой морфологии рельсовой стали, разрушенной в условиях деформации растяжением.

Материалом исследования служили образцы 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 производства АО «Евраз – ЗСМК», полученных из вакуумированной электростали Э76ХФ. Деформацию одноосным растяжением плоских пропорциональных образцов в виде двухсторонних лопаток с размерами рабочей области 1,5x4,45x8,0 мм осуществляли на испытательной машине Instron 3369 при скорости нагружения 1,2 мм/мин. Установлено, что предел прочности на разрыв изменяется от 1247 МПа до 1335 МПа; деформация образцов при разрушении – от 0,22 до 0,26. Дефектную субструктуру стали в зоне разрушения исследовали методами просвечивающей (метод тонких фольг) электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100 JEOL).

Структура исследуемой стали по морфологическому содержит следующие составляющие: зерна перлита пластинчатой морфологии, зерна феррито-карбидной смеси (зерна вырожденного перлита) и зерна структурно свободного феррита (зерна феррита, в объеме которых нет частиц карбидной фазы), относительное содержание которых в материале 0,7, 0,27 и 0,03, соответственно [1]. Структура пластинчатого перлита представлена чередующимися пластинами феррита (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа) и пластинами цементита (карбид железа состава Fe<sub>3</sub>C, орторомбическая кристаллическая решетка) [1]. Разрушение стали в условиях одноосного растяжения плоских образцов не приводит к изменению морфологии материала. В зоне разрушения и вдали от нее присутствуют зерна с характерной для перлита пластинчатой структурой (рис. 1).

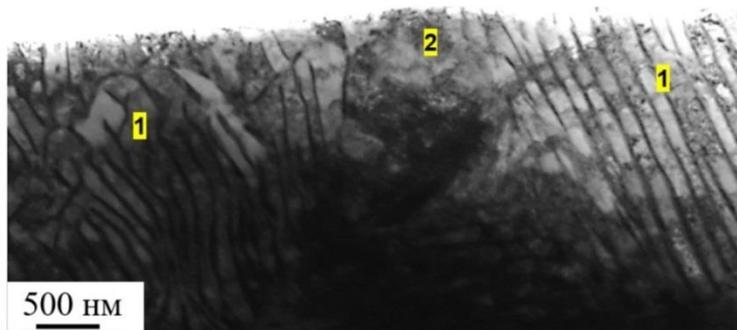


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры рельсовой стали: 1 – зерна пластинчатого перлита; 2 – зерна феррито-карбидной смеси

Преобразование структуры стали выявляется на уровне дефектной подсистемы и сопровождается множественным преобразованием перлита, а именно разбиением пластин феррита малоугловыми границами на фрагменты и существенным увеличением скалярной плотности дислокаций с  $3,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $7,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Деформация исследуемой стали сопровождается разрушением пластин цементита по механизмам разрезания и растворения с последующим выносом углерода движущимися дислокациями в объем пластин феррита с образованием в них наноразмерных (8,3 нм) частиц третичного цементита округлой формы (рис. 2). Наиболее отчетливо частицы такого размера обнаруживаются при использовании методики темнопольного анализа (рис. 2 б). Наряду с растворением, пластическая деформация стали сопровождается фрагментацией пластин цементита. Обнаружено, что в зоне разрушения образцов пластины цементита, сохраняя свою исходную морфологию, разбиваются на наноразмерные фрагменты (~9,3 нм).

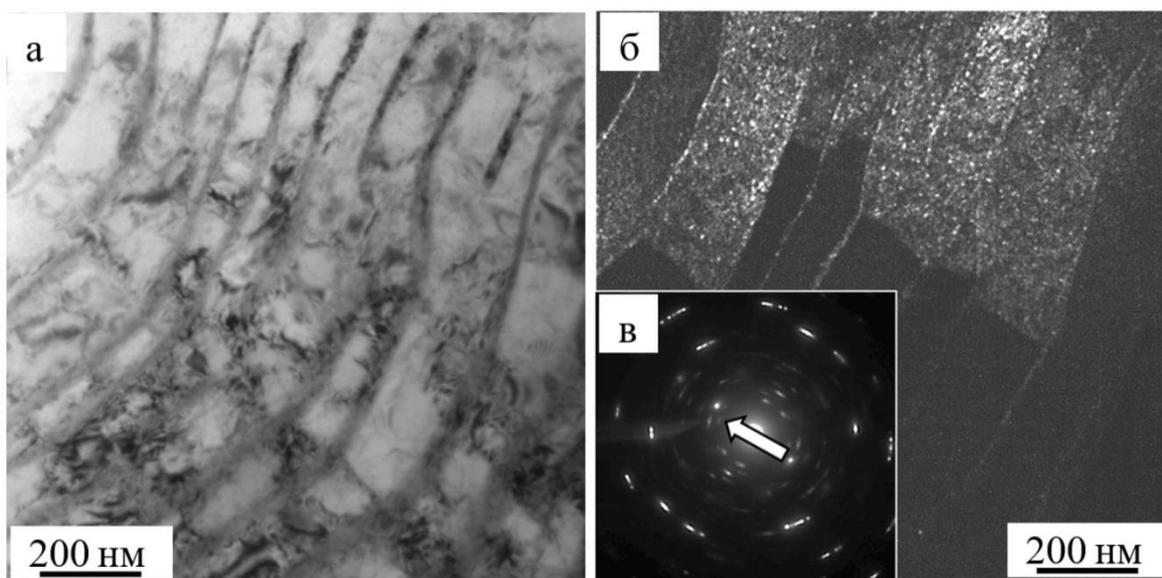


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение наноразмерных частиц цементита, образовавшихся в пластинах феррита рельсовой стали; светлое поле (а) темное поле (б), полученное в рефлексе  $[110]\alpha\text{-Fe} + [121]\text{Fe}_3\text{C}$ ; микроэлектронограмма (в), стрелкой указан рефлекс, в котором получено темнопольное изображение (б)

Результаты, полученные в данной работе, сопоставимы с результатами исследований структуры рельсовой стали после деформации сжатием до 50% [4]. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что деформационное упрочнение носит многостадийный характер и сопровождается фрагментацией перлитных зерен, усиливающейся по мере увеличения степени деформации и достигающей  $\approx 0,4$  объема исследуемой фольги при  $\epsilon = 50 \%$ . Также обнаружено разрушение пластин цементита по механизмам их растворения и разрезания подвижными дислокациями с образованием частиц третичного цементита размерами 2-4 нм.

1. Yuriev A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. USA : Materials Research Forum LLC. – 2021. – 190 p.
2. Tung P.-Y., Zhou X., Mayweg D., Morsdorf L., Herbig M. Under-stoichiometric cementite in decomposing binary Fe-C pearlite exposed to rolling contact fatigue // Acta Materialia. 2021. V. 216. P. 117144.
3. Fang F., Zhao Y., Liu P., Zhou L., Hub X., Zhou X., Xie Z. Deformation of cementite in cold drawn pearlitic steel wire // Materials Science and Engineering: A. 2014. V. 608. P. 11–15.
4. 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.

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ Ti-Al-Ta-Si-N, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ  
Шугуров А.Р., Кузьминов Е.Д. .... 83

ЭЛЕКТРОННОЕ СТРОЕНИЕ И МЕЗОМЕХАНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРНЫЕ СОСТОЯНИЯ СПЕЧЁННОГО КАРБИДА ЦИРКОНИЯ  
Шулёпов И.А., Дедова Е.С., Бурлаченко А.Г., Буякова С.П. .... 85

## **СЕКЦИЯ 2. ФИЗИКА ПЛАСТИЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ. ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ**

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В МИКРОКРИСТАЛЛАХ ЦИНКА  
Аглетдинов Э.А., Наймарк О.Б. .... 88

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ РЕАКТОРНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ЭК-164 ПОСЛЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ОБРАБОТОК  
Аккузин С.А., Литовченко И.Ю., Ким А.В., Алмаева К.В., Круковский К.В. .... 90

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА ПРИ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ  
Аксёнова К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ващук Е.С. .... 91

СТРУКТУРА СПЛАВА Al-10Si-2Cu, РАЗРУШЕННОГО В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ  
Аксёнова К.В., Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Клопотов А.А., Устинов А.М., Якупов Д.Ф. .... 93

ВЛИЯНИЕ ПРИСУТСТВИЯ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА В КОНТАКТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА ХАРАКТЕР СУХОГО СКОЛЬЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА  
Алеутдинова М.И., Фадин В.В. .... 95

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ 12% ХРОМИСТОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823  
Алмаева К.В., Полехина Н.А., Литовченко И.Ю., Линник В.В. .... 96

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ FeMnCrNiCo(N)  
Астафурова Е.Г., Астафуров С.В., Мельников Е.В., Панченко М.Ю., Реунова К.А., Загибалова Е.А., Нифонтов А.С., Гуртова Д.Ю., Астапов Д.О. .... 98

ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАДИЙНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
Банников М.В., Саженов Н.А., Балакирев А.А., Баяндин Ю.В., Никитюк А.С., Уваров С.В., Наймарк О.Б. .... 99

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ 1163 С МДО-ПОКРЫТИЕМ  
Бао Ф., Башкова Т.И., Люй Л. .... 101

СТАДИЙНОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННЫХ КРИВЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА TiNi  
Битгер С.М., Жеронкина К.А., Полетика Т.М., Гирсова С.Л. .... 103

АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ  $V_2 \leftrightarrow R$  ПРЕВРАЩЕНИЯ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СПЛАВЕ Ti – 50.9 АТ.%Ni  
Битгер С.М., Жеронкина К.А., Полетика Т.М., Гирсова С.Л. .... 104