

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ/CONDENSED MATTER PHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.41>

НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПЛОЩАДКЕ ТЕКУЧЕСТИ И СТАДИИ ЛЕГКОГО СКОЛЬЖЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА

Научная статья

Баранникова С.А.^{1,*}¹ORCID : 0000-0001-5010-9969;¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Российская Федерация¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (bsa[at]ispms.ru)

Аннотация

Проведённые механические испытания на одноосное растяжение подтвердили возможность визуализации зон локализации пластической деформации методом двухэкспозиционной спекл-фотографии на начальных стадиях пластической деформации в монокристаллах стали Гадфильда. Исследован характер неоднородности пластической деформации на стадиях легкого скольжения и площадке текучести при заданной кристаллографической ориентировке систем скольжения или двойникования. Данные свидетельствуют, что в случае монокристаллов, ориентированных для синглетного скольжения или двойникования, возникает только один очаг локализованной пластичности. При мультиплетном скольжении одновременно сосуществуют два очага локализованной пластичности, ориентация каждого из которых соответствует одной из активированных систем скольжения или двойникования. Полученные результаты о неоднородности деформации необходимо учитывать при разработке физических механизмов, ответственных за достижение высоких прочностных свойств в аустенитных нержавеющих сталях.

Ключевые слова: монокристаллы, спекл-фотография, пластическая деформация, локализация, механические испытания.

HETEROGENEITY OF PLASTIC DEFORMATION AT THE YIELD POINT AND THE STAGE OF EASY GLIDE IN HADFIELD STEEL SINGLE CRYSTALS

Research article

Barannikova S.A.^{1,*}¹ORCID : 0000-0001-5010-9969;¹Institute of Strength Physics and Materials Science, Tomsk, Russian Federation¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation¹Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russian Federation

* Corresponding author (bsa[at]ispms.ru)

Abstract

Mechanical tests conducted on uniaxial tension confirmed the possibility of visualising areas of plastic deformation using the double-exposure speckle photography method in the initial stages of plastic deformation in Hadfield steel single crystals. The nature of plastic deformation heterogeneity at the stages of easy glide and yield point was examined for a given crystallographic orientation of glide or twinning systems. The data show that in the case of single crystals oriented for singlet glide or twinning, only one focus of localised plasticity arises. In the case of multiple glide, two foci of localised plasticity coexist, the orientation of each of which corresponds to one of the activated glide or twinning systems. The obtained results on deformation heterogeneity must be taken into account when developing the physical mechanisms responsible for achieving high strength properties in austenitic stainless steels.

Keywords: single crystals, speckle photography, plastic deformation, localisation, mechanical testing.

Введение

Процесс пластического течения твердых тел является многостадийным, причем обычно каждой стадии соответствует специфический микромеханизм, связанный с движением дефектов кристаллического строения [1]. Одной из важных проблем, связанной с локализацией пластического течения, является ожидаемое соответствие паттернов локализованной пластичности и стадий деформационного упрочнения [2], [3], [4]. Последние формально характеризуются зависимостью коэффициента деформационного упрочнения от деформации [1]. В многочисленных экспериментах, результаты которых обобщены в монографии [2], было замечено, что форма распределений локальных деформаций эволюционирует при изменении действующего на данной стадии закона деформационного упрочнения, то есть при переходе от одной стадии к другой. Это обстоятельство кажется важным для развития моделей пластического течения и деформационного упрочнения перспективных конструкционных материалов. Выяснению закономерностей такой связи в металлических монокристаллах посвящена настоящая работа.

Одним из приоритетных классов конструкционных материалов, используемых в современной промышленности, являются высокопрочные аустенитные стали. Высокомарганцевая аустенитная сталь Гадфильда [5], обладающая высокой износоустойчивостью при трении с давлением и ударами, используется для изготовления зубьев ковшей экскаваторов, траков гусениц тракторов и танков, железнодорожных крестовин, деталей камнедробилок. Анализ

результатов исследований в формировании прочностных свойств, полученных на поликристаллах высоколегированных сталей, осложняется границами зерен и требует целого ряда специальных исследований. В физике пластичности в экспериментальных исследованиях главных закономерностей и особенностей пластической деформации традиционно используются монокристаллы [1]. Отсутствие в них границ зерен и постоянство свойств по всему объему позволяют в этом случае наиболее точно представить основные элементы кристаллографии скольжения, выделить стадии процесса и связать их с особенностями дефектной структуры и ее эволюцией [1]. Использование монокристаллов высокомарганцевистой (13% Mn) аустенитной стали в настоящей работе вызвано тем, что за счет выбора ориентации оси растяжения в таких монокристаллах возможна смена механизма деформации от дислокационного скольжения к двойникованию [6]. При этом возникает возможность сравнения картин локализованной деформации при работе разных деформационных механизмов [2]. Таким образом, в настоящей статье ставится задача провести исследование закономерностей неоднородности пластического течения на ранних стадиях пластического течения при скольжении и двойниковании, в зависимости от ориентации оси растяжения деформации в монокристаллах стали Гадфильда. Сведения о роли механизмов деформационного упрочнения и ориентации кристалла на процессы локализации пластического течения стали позволят создавать текстурированные материалы с набором заданных свойств и конструировать материалы «по типу стали Гадфильда».

Методы и принципы исследования

Интерес к монокристаллам нержавеющей высокомарганцевистой стали Fe-13% Mn (сталь Гадфильда) вызван возможностью эффективно менять форму их диаграммы растяжения и активировать дислокационное скольжение или двойникование не только выбором кристаллографического направления оси растяжения, но и дополнительным легированием примесями внедрения углерода [5], [7], [8], [10]. Монокристаллы выращивались методом Бриджмена на установке «Редмет-1» [11]. Кристаллографическая ориентация монокристаллов перед вырезкой образцов, а также ориентация осей растяжения образцов определялись рентгенографическим методом вращающегося кристалла. Образцы с содержанием углерода $\sim 1\%$, вырезанные из монокристаллических булей электроэрозийным способом, далее гомогенизировались в инертном газе при 1373 K, а затем закаливались в воде после выдержки 1 час от той же температуры. Подготовленные образцы подвергались одноосному растяжению на испытательной машине «Instron-1185» при постоянной скорости перемещения подвижного захвата $V_m = 0,2$ мм/мин при $T = 300$ K.

Для исследования полей макроскопической неоднородности деформации на базе метода двух-экспозиционной спекл-фотографии [2] использовалась установка ALMEC (Automatic Laser Measuring Complex), в состав которой входит блок автоматического сканирования спеклограмм и пакет программ для декодирования, анализа и визуализации результатов измерения. Данная методика позволила исследовать закономерности эволюции пространственно-временных распределений компонент тензора пластической дилатации при активном нагружении образцов [12] на следующих стадиях деформационного упрочнения — площадке текучести и легком скольжении [1].

Основными характеристиками процесса локализации пластического формоизменения, рассматриваемыми далее, являются число и скорость перемещения зон локализации деформации вдоль растягиваемого образца, которая находится следующим образом. Поскольку при растяжении с постоянной скоростью общая деформация пропорциональна времени $\epsilon_{tot} \sim t$, то, определяя координату X максимумов локальных деформаций ϵ_{xx} вдоль оси растяжения образца в ходе нагружения, по наклону зависимости $X(t)$ можно вычислить скорость перемещения зон локализации пластической деформации $V = dX/dt$ (рис. 1). Для построения пространственных распределений деформаций используются приращения деформации за время между двумя состояниями образца при деформации. Они иллюстрируют мгновенные состояния и позволяют графически определить пространственные характеристики локализации (рис. 2–3). Для количественного анализа используют выборки компонент деформации вдоль оси деформации. Сопоставляя последовательности распределений для различных участков диаграммы растяжения, можно выявить пространственно-временные закономерности в изменениях деформации.

Основные результаты

Микро- и макроскопические детали процесса остаточной деформации в сплавах и в чистых металлах заметно различаются [1]. В отличие от чистых металлов, в которых нелегко создать условия для реализации синглетного скольжения, склонность к локализации скольжения в одной системе проявляется в сплавах даже у образцов, ориентированных для мультиплетного скольжения, приводя к появлению стадии легкого скольжения, а иногда к деформации Чернова-Людерса при постоянном деформирующем напряжении [1].

Площадка текучести наблюдалась в ориентированных вдоль направлений [377] и [355] исследуемых монокристаллах с содержанием 1%С. Плоскость наблюдения в этих образцах имела индексы (011). Для указанных ориентаций благоприятное сочетание низкой энергии дефекта упаковки $\sim 0,023$ Дж/м² и высокого уровня деформирующих напряжений за счет твердорастворного упрочнения углеродом приводит к развитию двойникования на ранних стадиях пластической деформации [6], [11]. В ориентированных вдоль [377] монокристаллах основным механизмом пластической деформации в условиях растяжения при комнатной температуре является двойникование в первичной системе (111) [211], причем деформационное упрочнение в таких условиях отсутствует. Площадка текучести (стадия I) вместе с зубом текучести имела протяженность до 0,25 и была обусловлена зарождением и распространением по кристаллу полосы Людерса, состоящей из двойников деформации. Анализ положений зон локализованной деформации показал, что на протяжении всей площадки текучести вдоль образца с постоянной скоростью 9×10^{-6} м/с, определенной, как сказано выше, по углу наклона прямолинейного графика $X-t$, показанного на рис. 1, движется одиночный фронт пластической деформации (рис. 2).

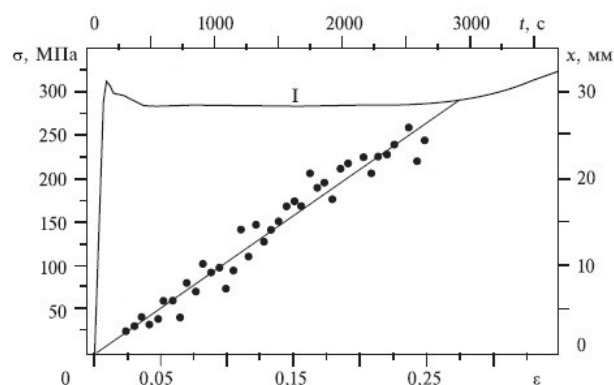


Рисунок 1 - Начальные стадии кривой пластического течения монокристалла стали Гадфильда и график движения очага локализованной деформации на стадии I

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.41.1>

При анализе локализации пластической деформации образцов того же сплава с другой ориентацией оси растяжения [355] был установлен более сложный характер этого явления, связанный, по-видимому, с особенностями механизма двойникования в этом случае. Известно [6], [11], что при содержании углерода в монокристаллах стали Гадфильда $\sim 1\%$ и направлением оси растяжения [111], начиная с предела текучести, реализуется множественное двойникование по трем системам, а диаграмма нагружения содержит только участок линейного упрочнения, продолжающийся вплоть до разрушения. Ориентация [355] находится в стандартном стереографическом треугольнике между двумя предельными случаями [111] и [377]. Поэтому диаграмма растяжения таких образцов помимо стадии линейного упрочнения II содержит зуб и площадку текучести (стадия I), а процесс пластического течения начинается с одиночного двойникования.

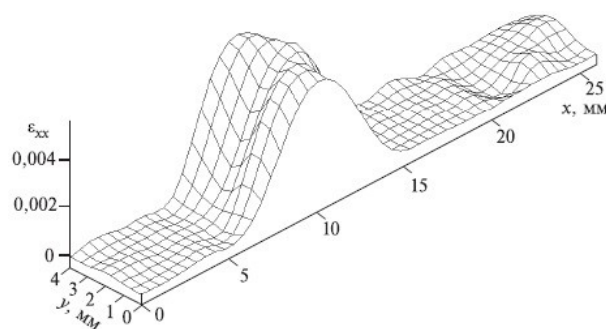


Рисунок 2 - Одиночный деформационный фронт на площадке текучести в интервале 0,10-0,102 общей деформации в монокристалле стали Гадфильда

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.41.2>

Кроме того, деформационная кривая в этом случае содержит стадию с малым, но отличным от нуля коэффициентом деформационного упрочнения θ . Она соответствует стадии легкого скольжения при дислокационной деформации. Экспериментально установлено, что переход к развитому множественному двойникованию и к линейной стадии II с большим θ происходит через еще один линейный участок (стадия I') с меньшим θ . Исследование распределений локальных деформаций показало, что на площадке текучести (стадия I) от неподвижного захвата со скоростью $1,9 \times 10^{-5}$ м/с движется одиночный очаг деформации, разделяющий деформированный и недеформированный объемы материала [12]. Аналогичная картина локализации пластического течения описана выше для ориентации [377].

Для ориентации [355] удалось наблюдать разделение фронтов (очагов) локализованной деформации. Так, на стадии I' от первичного очага деформации отделяется еще один фронт. При этом основная деформационная зона продолжает двигаться с прежней скоростью по недеформированной части, а новая перемещается по уже деформированной области образца в противоположном направлении со скоростью $-5,5 \times 10^{-5}$ м/с. Такая ситуация дважды повторяется на протяжении стадии I'. Стадия I' заканчивается, когда первый деформационный фронт проходит по всей длине образца.

Большой интерес представляют исследования кривой течения и картин локализации на стадии легкого скольжения при деформации двойникованием. Эта ситуация может быть реализована следующим образом.

При содержании углерода в исследуемых монокристаллах $\sim 1\%$ и ориентации оси растяжения [111], начиная с предела текучести, реализуется множественное двойникование по трем системам, а диаграмма нагружения содержит

участок линейного деформационного упрочнения, продолжающийся вплоть до разрушения. Кроме того, в начале кривой пластического течения (сразу после предела текучести) наблюдался участок, для которого $\theta \approx 0$.

Распределения локальных удлинений на стадии легкого скольжения таких монокристаллов имели форму совокупности трех расположенных на одинаковых расстояниях синхронно перемещающихся широких деформационных зон. Скорость движения очагов локализации деформации составила $\sim 3,2 \times 10^{-5}$ м/с.

В отличие от описанных выше случаев деформации монокристаллов за счет двойникования, для ориентаций [123] и [012] в этом случае основным механизмом деформации вплоть до $\varepsilon_{\text{tot}} \approx 0,10-0,15$ является дислокационное скольжение. На этой стадии пластического течения в ориентированных вдоль [123] и [012] кристаллах деформация происходит с высокими значениями θ , величина которых превышает значения, обычно наблюдаемые на стадии I монокристаллов чистых металлов и сплавов замещения, и оказывается близкой к θ на стадии II линейного упрочнения монокристаллов [1], [11]. Затем при деформации $\varepsilon_{\text{tot}} \approx 0,2$ кристалл деформируется двойникованием, на что указывает скачкообразность кривых течения.

При анализе распределений локальных деформаций образца с ориентацией [123] были обнаружены следующие особенности. На стадии I со стороны неподвижного захвата движутся с одинаковой скоростью $3,1 \times 10^{-5}$ м/с две широкие деформационные зоны, разделяющие деформированную и недеформированную части материала (рис. 3). Стадия I заканчивается, когда деформационные фронты проходят всю длину образца.

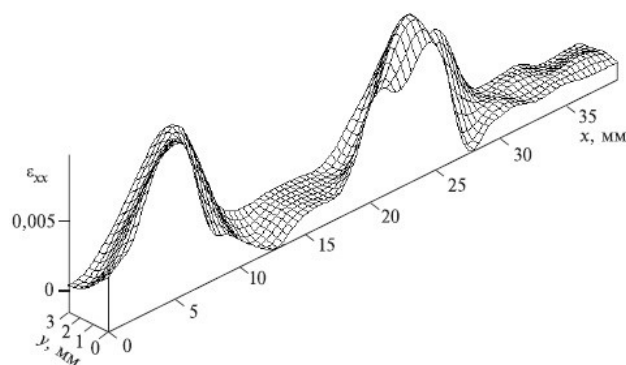


Рисунок 3 - Картина локальных деформаций в образце монокристалла стали Гадфильда в интервале общей деформации 0,122 – 0,124 на стадии легкого скольжения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.41.3>

Для монокристаллов с ориентацией [012], на деформационной кривой можно выделить стадию легкого скольжения I, состоящую из двух участков с разными θ . В распределениях локальных деформаций обнаружены следующие особенности. На стадии I со стороны неподвижного захвата машины движется со скоростью $\sim 5 \times 10^{-5}$ м/с один деформационный фронт, разделяющий деформированную и недеформированную части образца. Далее на участке с меньшим θ движутся две зоны локализованной деформации, состоящие из двух связанных очагов, со скоростями $\sim 7 \times 10^{-5}$ м/с.

Обсуждение

Принципиальным следствием наблюдаемых явлений явилось признание того факта, что неоднородность является неотъемлемой чертой пластического течения и сопровождает весь ход этого процесса, принципиально важно. Локализация помечает в деформируемом объеме наиболее физически существенные участки среды (очаги), в которых деформация обгоняет в развитии процессы, идущие в других объемах. Это означает, что внимание исследователей должно быть сосредоточено на форме таких очагов и деформации в них. В свою очередь самопроизвольное рождение зон локализованной пластичности сигнализирует о формировании структуры среды [2].

Очаг локализованной пластичности в деформируемой среде документирует процесс структурообразования, которое является предметом интересов теории неравновесных систем — раздела науки, нацеленного на поиск причин возникновения порядка в открытых неравновесных системах [13].

Движение одиночных очагов локализованной пластичности на стадиях легкого скольжения и площадке текучести соответствует фронту Людерса, который переводит среду из метастабильного упруго деформируемого в стабильное пластически деформируемое состояние. Этот переход может реализоваться в системе только один раз, что объясняет однократное прохождение фронта Людерса по образцу. Закономерности развития деформации на площадке текучести при деформации Людерса заставляют описать движение фронта, используя такое понятие, как *автоволна переключения* в среде из бистабильных элементов [2]. Такая автоволна необратимо меняет свойства деформируемой среды, переводя ее в новое состояние.

В такой постановке автоволновой подход к проблеме физики пластичности естественным образом становится частью проблематики теории неравновесных систем [13], обретая права и возможности использовать ее понятия и аппарат для решения задач, а достижения — для построения аналогий. Возможность ввести проблему пластичности в круг таких явлений, конечно, следует рассматривать как большую удачу исследователей, поскольку это обогащает изучение пластичности методологией и аппаратом теории неравновесных процессов и синергетики [13]. Обретя эти возможности, наука о пластичности пополнилась методами решения таких задач, которые в рамках традиционных подходов считались неразрешимыми. Для нынешнего состояния этой науки такие возможности кардинально важны,

поскольку на протяжении нескольких последних десятков лет исследователи в этой области были участниками или свидетелями многочисленных тщетных попыток решить проблему пластичности, осуществляемых почти исключительно на базе просвечивающей электронной микроскопии дислокационных структур в деформированных монокристаллах [1].

Заключение

Визуализация полей локальных деформаций, регистрируемых методом двух-экспозиционной спекл-фотографии, показала, что во всех рассмотренных случаях в монокристаллах стали Гадфильда, ориентированных для одиночного скольжения или двойникования, на площадке текучести (стадии легкого скольжения) картины локализации деформации представляли собой одиночные движущиеся фронты деформации, подобные полосам Людерса. Такое же движение деформационных фронтов наблюдалось ранее на площадках текучести в поликристаллах малоуглеродистой стали.

Стадия легкого скольжения заканчивается либо с завершением движения единичного фронта, либо при встрече двух очагов деформации. Таким образом, есть основание полагать, что на стадии I пластического течения картина локализация макроскопической деформации монокристаллов обусловлена числом активных систем скольжения или двойникования.

Дальнейшее деформирование сопровождается ростом напряжения и на диаграмме растяжения возникает стадия линейного деформационного упрочнения, на которой меняется тип распределения локальных деформации, который характеризуется наличием движущихся с постоянной скоростью 4...5 равноудаленных зон локализации (максимумов компоненты локальных удлинений).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН (проект № FWRW-2021-0011).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, topic No. FWRW-2021-0011.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Бернер Р. Пластическая деформация монокристаллов / Р. Бернер, Г. Кронмюллер. — Москва: Мир, 1969. — 272 с.
2. Зуев Л.Б. Физика неоднородности пластического течения / Л.Б. Зуев, Ю.А. Хон, В.В. Горбатенко. — Москва: Физматлит, 2024. — 320 с.
3. Зуев Л.Б. Пластическое течение как процесс формирования пространственно-временных структур. Часть I. Качественные и количественные закономерности. / Л.Б. Зуев, Ю.А. Хон // Физическая мезомеханика. — 2021. — № 24 (6). — С. 5–14. — DOI: 10.24412/1683-805X-2021-6-5-14
4. Zuev L.B. The features of localized plasticity autowaves in solids. / L.B. Zuev, S.A. Barannikova, O.A. Maslova // Materials Research. — 2019. — № 22 (4). — P. 20180694. — DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2018-0694
5. Adler P.H. Strain hardening of Hadfield manganese steel. / P.H. Adler, G.B. Olson, W.S. Owen // Metallurgical and Materials Transactions A. — 1986. — № 17 (10). — P. 1725–1737. — DOI: 10.1007/BF02817271
6. Efstathiou C. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel. / C. Efstathiou, H. Sehitoglu // Acta Materialia. — 2010. — № 58 (5). — P. 1479–1488. — DOI: 10.1016/j.actamat.2009.10.054
7. Roshan J. Recent advancements in manganese steels — a review. / J. Roshan, S.R. Sankaranarayanan, S.P. Kumares Babu // Materials Today: Proceedings. — 2020. — № 27. — P. 2852–2858. — DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.296
8. Гервасьев М.А. Изменение микроструктуры и деформационное упрочнение высокомарганцевых сталей при растяжении. / М.А. Гервасьев, В.А. Хотин, Н.Н. Озерец и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2020. — № 3. — С. 3–6. — DOI: 10.1016/j.actamat.2017.06.046
9. De Cooman B.C. Twinning-induced plasticity (TWIP) steels. / B.C. De Cooman, Yu. Estrin, S.K. Kim // Acta Materialia. — 2018. — № 142. — P. 283–362. — DOI: 10.1016/j.actamat.2017.06.046
10. Zhang L. Serrated flow and failure behaviors of a Hadfield steel at various strain rates under extensometer-measured strain control tensile load. / L. Zhang, P. Guo, G. Wang et al. // Journal of Materials Research and Technology. — 2020. — № 9 (2). — P. 1500–1508. — DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.11.075
11. Karaman I. Deformation of single crystal Hadfield steel by twinning and slip. / I. Karaman, H. Sehitoglu, K. Gall et al. // Acta Materialia. — 2000. — № 48 (6). — P. 1345–1359. — DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00383-3
12. Баранникова С.А. Исследование локализации деформации на начальных стадиях пластического течения высокомарганцевистой стали. / С.А. Баранникова // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. — 2022. — № 65 (10). — С. 699–705. — DOI: 10.17073/0368-0797-2022-10-699-705
13. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен. — Москва: URSS, 2014. — 317 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Berner R. Plasticheskaya deformaciya monokristallov [Plastic deformation of single crystals] / R. Berner, G. Kronmyuller. — Moscow: Mir, 1969. — 272 p. [in Russian]
2. Zuev L.B. Fizika neodnorodnosti plasticheskogo techeniya [Physics of inhomogeneity of plastic flow] / L.B. Zuev, Yu.A. Xon, V.V. Gorbatenko. — Moscow: Fizmatlit, 2024. — 320 p. [in Russian]
3. Zuev L.B. Plasticheskoe techenie kak process formirovaniya prostranstvenno-vremenny'x struktur. Chast' I. Kachestvenny'e i kolichestvenny'e zakonomernosti [Plastic flow as a process of formation of space-time structures. Part I. Qualitative and quantitative regularities]. / L.B. Zuev, Yu.A. Xon // Physical mesomechanics. — 2021. — № 24 (6). — P. 5–14. — DOI: 10.24412/1683-805X-2021-6-5-14 [in Russian]
4. Zuev L.B. The features of localized plasticity autowaves in solids. / L.B. Zuev, S.A. Barannikova, O.A. Maslova // Materials Research. — 2019. — № 22 (4). — P. 20180694. — DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2018-0694
5. Adler P.H. Strain hardening of Hadfield manganese steel. / P.H. Adler, G.B. Olson, W.S. Owen // Metallurgical and Materials Transactions A. — 1986. — № 17 (10). — P. 1725–1737. — DOI: 10.1007/BF02817271
6. Efstathiou C. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel. / C. Efstathiou, H. Sehitoglu // Acta Materialia. — 2010. — № 58 (5). — P. 1479–1488. — DOI: 10.1016/j.actamat.2009.10.054
7. Roshan J. Recent advancements in manganese steels — a review. / J. Roshan, S.R. Sankaranarayanan, S.P. Kumares Babu // Materials Today: Proceedings. — 2020. — № 27. — P. 2852–2858. — DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.296
8. Gervas'ev M.A. Izmenenie mikrostruktury' i deformacionnoe uprochnenie vy'sokomargancevy'x stalej pri rastyazhenii [Microstructure change and deformation hardening of high-manganese steels under tension]. / M.A. Gervas'ev, V.A. Xotinov, N.N. Ozerecz et al. // Metallurgy and heat treatment of metals. — 2020. — № 3. — P. 3–6. — DOI: 10.1016/j.actamat.2017.06.046 [in Russian]
9. De Cooman B.C. Twinning-induced plasticity (TWIP) steels. / B.C. De Cooman, Yu. Estrin, S.K. Kim // Acta Materialia. — 2018. — № 142. — P. 283–362. — DOI: 10.1016/j.actamat.2017.06.046
10. Zhang L. Serrated flow and failure behaviors of a Hadfield steel at various strain rates under extensometer-measured strain control tensile load. / L. Zhang, P. Guo, G. Wang et al. // Journal of Materials Research and Technology. — 2020. — № 9 (2). — P. 1500–1508. — DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.11.075
11. Karaman I. Deformation of single crystal Hadfield steel by twinning and slip. / I. Karaman, H. Sehitoglu, K. Gall et al. // Acta Materialia. — 2000. — № 48 (6). — P. 1345–1359. — DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00383-3
12. Barannikova S.A. Issledovanie lokalizacii deformacii na nachal'ny'x stadiyax plasticheskogo techeniya vy'sokomarganczovistoj stali [Localization of strains at the initial stage of plastic yield of high manganese steel]. / S.A. Barannikova // News of Universities. Ferrous Metallurgy. — 2022. — № 65 (10). — P. 699–705. — DOI: 10.17073/0368-0797-2022-10-699-705 [in Russian]
13. Xaken G. Informaciya i samoorganizaciya. Makroskopicheskiy podxod k slozhny'm sistemam [Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems] / G. Xaken. — Moscow: URSS, 2014. — 317 p. [in Russian]