ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК
Том 20. Выпуск 3.

УДК 666.982.24 DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-3-478-493

Развитие механизмов водородного растрескивания металлических систем и методов защиты стального проката от коррозионно-механического разрушения[1]

Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, П. Н. Медведев, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий

Сергеев Николай Николаевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
Сергеев Александр Николаевич — доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: ansergueev@gmail.com
Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru
Медведев Павел Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: medvedeff_82@mail.ru
Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru
Малий Дмитрий Владимирович — старший преподаватель кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: maliydmitriy@yandex.ru

Аннотация

Хрупкое разрушение высокопрочных металлов и сплавов применяемых на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности, вызванное воздействием агрессивных водородсодержащих сред, представляет собой серьезную научную проблему, актуальность которой за последние десятилетия резко возросла в связи с открытием аномального воздействия водорода на комплекс свойств металлов и сплавов (аномальная пластическая автодеформация железа, структурно-фазовые превращения, синергетические эффекты микропластичности, эффект обратимой потери формы в аморфных металлических сплавах и многие другие). Значительное количество источников водорода (коррозия в водных растворах, абсорбция водорода при производстве сварочных операций и нанесении технологических защитных покрытий или при катодной защите подземных трубопроводов) вызывает значительные трудности при описании процессов водородной

[1]Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программе «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEF 157717X0271)

деградации металлических материалов. Деградация проявляется различными способами, такими как: водородное растрескивание (ВР) высокопрочных сталей; участие водорода в процессе коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) нержавеющих сталей; растрескивание труб ядерных реакторов, выполненных из циркониевых сплавов и охрупчивание титановых сплавов путем образования гидрида, деградация GaAs монолитных СВЧ-интегральных схем на спутниках и др. Вредное влияние водорода на механические свойства впервые было отмечено Джонсоном в 1875 г. С того времени ученые добились многих успехов в разработке металлов с оптимальными параметрами прочности и пластичности. Несмотря на многолетние исследования проблема взаимодействия систем металл-водород остается открытой в связи с разнообразием подходов и методик к оценке охрупчивающего воздействия водорода и водородсодержащих сред. Так вплоть до настоящего времени не удалось установить единый механизм взаимодействия водорода с металлическими материалами, который позволил бы объяснить всю совокупность явлений, связанных с водородным разрушением. Поэтому анализ механизмов водородного растрескивания металлических систем и разработка методов защиты стального проката от коррозионно-механического разрушения являются актуальными направлениями научной и практической деятельности.

Ключевые слова: водородное растрескивание, металлические системы, коррозионно-механическое разрушения, ресурсосберегающие технологии.

Библиография: 40 названия.

Для цитирования:
Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, П. Н. Медведев, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий. Развитие механизмов водородного растрескивания металлических систем и методов защиты стального проката от коррозионно-механического разрушения // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 3, с. 478–493.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK
Vol. 20. No. 3.

UDC 666.982.24 DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-3-478-493

Development of mechanisms of hydrogen cracking of metal systems and methods to protect steel products from corrosion-mechanical destruction[2]

N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, A. E. Gvozdev, P. N. Medvedev, S. N. Kutepov, D. V. Maliy

Sergeev Nikolay Nikolaevich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
Sergeev Aleksander Nikolaevich — Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: ansergueev@gmail.com
Gvozdev Aleksander Evgenievich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief researcher of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru
Medvedev Pavel Nikolaevich — Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

[2]The work was carried out within the framework of the Federal Program "Research and development in priority areas of development of the scientific and technological complex of Russia for 2014–2020"(unique identifier of the project RFMEFI57717X0271).

e-mail: medvedeff_82@mail.ru
Kutepov Sergey Nikolaevich — Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru
Maliy Dmitry Vladimirovich — Senior Lecturer of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: maliydmitriy@yandex.ru

Abstract

The brittle destruction of high-strength metals and alloys used in the chemical and oil refining industry, caused by the influence of aggressive hydrogen-containing media, is a serious scientific issue, the relevance of which has increased dramatically in recent decades due to the discovery of the anomalous hydrogen effects on the complex properties of metals and alloys (abnormal plastic auto-deformation of iron, structural-phase transformations, synergistic effects of microplasticity, effect of reversible shape loss in amorphous metal alloys, and many others). A significant number of hydrogen sources (corrosion in aqueous solutions, hydrogen absorption in the production of welding operations and application of technological protective coatings or cathodic protection of underground pipelines) causes significant difficulties in describing the processes of hydrogen degradation of metal materials. Degradation is manifested in various ways, such as: hydrogen cracking of high-strength steels; hydrogen participation in the process of stress corrosion cracking of stainless steels; cracking of nuclear reactor tubes made of zirconium alloys and embrittlement of titanium alloys by hydride formation, GaAs degradation of monolithic microwave integrated circuits on satellites, etc. The harmful effect of hydrogen on mechanical properties was first noted by Johnson in 1875. Since then, scientists have made many advances in the development of metals with optimal parameters of strength and plasticity. Despite many years of research, the problem of interaction of metal-hydrogen systems remains open due to the variety of approaches and techniques to the assessment of embrittlement effects of hydrogen and hydrogen-containing media. So far it has not been possible to establish a single mechanism of interaction of hydrogen with metal materials, which would explain the whole set of phenomena, related to hydrogen destruction. Therefore, to analyze the mechanisms of hydrogen cracking of metal systems and to develop methods of steel products protection from corrosion-mechanical destruction are relevant areas of scientific and practical activities.

Keywords: hydrogen cracking, metal systems, corrosion-mechanical destruction, resource-saving technologies.

Bibliography: 40 titles.

For citation:
N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, A. E. Gvozdev, P. N. Medvedev, S. N. Kutepov, D. V. Maliy, 2019, "Development of mechanisms of hydrogen cracking of metal systems and methods to protect steel products from corrosion-mechanical destruction" , *Chebyshevskii sbornik*, vol. 20, no. 3, pp. 478–493.

1. Введение

Большая часть исследований ВР и КРН проводится в условиях лабораторных испытаний, на образцах, имеющих различный химический состав и физико-механические характеристики, что затрудняет создание стройной теории ВР, единой базы данных испытаний, разработку стандартизированных методов исследования и рекомендаций по производству и обработке применяемых металлов и сплавов. Еще одним фактором, затрудняющим процесс феноменологического описания процессов ВР и КРН является отсутствие систематических данных испытаний натурных образцов и их корреляции с лабораторными испытаниями [1, 2]. Различные взгляды на микромеханизмы ВР и КРН были обсуждены и подробно рассмотрены в научной

литературе [3-9]. В этой связи особенно актуальной проблемой является создание комплексной методики исследования процессов ВР и КРН включающей в себя проведение испытаний точеных и натурных образцов, позволяющей определять сравнительную стойкость металлов и сплавов к растрескиванию в водородсодержащих средах [9]. Использование полученных результатов позволит определять долговечность и корректировать процессы изготовления и обработки металлов и сплавов с целью создания металлических конструкционных материалов с оптимальными физико-механическими характеристиками и химическим составом, стойких к ВР и КРН.

2. Методика исследования водородного растрескивания и коррозионно-механического разрушения металлических сплавов

Для повышения долговечности и исследования влияния внутренних и внешних факторов на чувствительность арматурных сталей к коррозионно-механическому разрушению коллективом авторов ТГПУ им. Л. Н. Толстого под руководством Н. Н. Сергеева была разработана комплексная методика ускоренных испытаний на КМР высокопрочных сталей, сущность которой включает:

1. Исследование стойкости высокопрочных сталей к ВР и КРН проводили на точеных и натурных образцах арматурных сталей марок: Ст3, Ст5, 18ГС, 20ГС, 20ГС2, 22ГСРМ, 30ГСТ, 35ГС, 20ХГ2Ц, 22Х2Г2АЮ, 23Х2Г2Т, 80С гладкокатанного и периодического профиля $\varnothing 6 \ldots 22$ мм и $l = 100 \ldots 400$ мм, как в исходном (горячекатанном или термоупрочненном состоянии), так и прошедших последующую термическую обработку. При выборе водородсодержащей среды для ускоренных лабораторных испытаний исходили из того, что ее действие должно соответствовать действию среды в реальных условиях работы конструкции (характер разрушения в лабораторных и эксплуатационных условиях должен быть одинаковым), и, вместе с тем, она должна обеспечивать сокращение длительности лабораторных испытаний. В связи с этим, в качестве среды вызывающей КРН использовали кипящий раствор нитратов (60% в.ч $Ca(NO_3)_2$ + 5% в.ч. $NH_4NO_3 + 35\%$ в.ч. H_2O) при температурах 70; 90; 110°С; а для исследования ВР использовали водный раствор серной кислоты с добавлением роданистого аммония (4,5% H_2SO_4 + 2,5% NH_4CNS) при комнатной температуре с катодной поляризацией при плотности тока $D_K = 60\text{А/м}^2$, так и без нее. Дополнительно при проведении сравнительных ускоренных испытаний использовали водный раствор серной кислоты (8% H_2SO_4) с анодной поляризацией при плотности тока $D_A = 3\text{А/м}^2$. Испытания проводили с использованием коррозионных камер и рычажных установок, разработанных Н. Н. Сергеевым [10] в условиях статического нагружения (при постоянной растягивающей нагрузке) при напряжениях $\sigma_Э = (0,1 \ldots 0,9)\sigma_B$. Стойкость стали против коррозионно-механического разрушения (КМР) оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 4...6 образцов на каждую экспериментальную точку графика. Сталь считали стойкой к растрескиванию если она не разрушилась после 200 часов испытаний при величине статических растягивающих напряжений не менее 75% от критического разрушающего напряжения [11-15].

2. Оценку влияния наводороживания, уровня растягивающих напряжений, длительности коррозионных процессов на субмикроструктурные изменения высокопрочной стали при испытаниях на длительную прочность применяли метод внутреннего трения (ВТ), позволяющий судить о характеристиках локального напряженного состояния металла. Измерения температурных зависимостей внутреннего трения (ТЗВТ) проводили на натурных образцах (d = 8, 10 и 12 мм; l = 200 мм) сталей (гладкокатанных и периодического профиля). Исследования кинетики процесса КМР производили в следующей последовательности: предварительно образцы подвергали комплексному и раздельному влиянию различных факторов – коррозионной среды, растягивающих напряжений, катодной поляризации от внешнего источника тока

при различном времени выдержки вплоть до момента предразрушения. Затем из натурных образцов вырезали образцы l = 200 мм и определяли ТЗВТ. Время между подготовкой образцов и измерением ВТ не превышало 1 часа. Измерения ТЗВТ проводили при различных температурах (20...500 °C) при $f \sim 10^3 c^{-1}$ по резонансной методике [16]. Наблюдали изменение высоты пика Кестера под влиянием вышеуказанных факторов. Измеряли также величину низкотемпературного фона ВТ 150 °C, который связан с наличием в материале субмикропустот. По резонансной частоте определяли величину модуля упругости. Исследовали влияние температуры отпуска на механические свойства и стойкость против растрескивания в водородсодержащих средах. Отпуск осуществляли с электронагрева в диапазоне температур 150...600 °C с интервалом в 50 °C. Скорость электронагрева составляла 10...15 °C/сек. Превращения, происходящие при отпуске, оценивали по изменению высоту пика Кестера, природу которого связывают с взаимодействием примесных атомов с дислокациями, а также с обусловленным этим взаимодействием уровнем внутренних локальных (пиковых) микронапряжений.

3. Измерение уровня остаточных напряжений производили на дифрактометре УРС-50ИМ в CoK_α излучении с автоматической записью интенсивностей линий (110) и (220). Исследования выполняли на натурных образцах, которые предварительно выдерживали под напряжением на воздухе и в среде с катодной поляризацией в течение различного периода времени. Для выявления кинетики наводороживания проводили газовый анализ образцов, электролитически наводороженных под напряжением.

4. Испытания на релаксацию напряжений при одноосном растяжении проводили на гладких образцах при комнатной температуре поддерживая скорость перемещения захвата постоянной для данной геометрии образца. Установленный в захватах испытательной машины образец нагружали и одновременно включали систему автоматического поддержания постоянства деформации на расчетной части образца, при этом регистрировали изменение нагрузки непрерывно или с таким интервалом, чтобы можно было полностью установить характер релаксации. Скорость нарастания напряжения в образце при нагружении контролировали таким образом, чтобы ее величина не превышала 700 МПа/мин. При нагружении до заданной деформации не допускается удлинение образца вследствие ползучести более чем на 0,01 мм за счет несинхронности включения системы автоматического поддержания деформации и нагружения образца.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Модель взаимодействие водорода с дислокационными скоплениями в металлах и металлических сплавах

Взаимодействие водорода с несовершенствами кристаллической решетки металлических материалов является важным и часто доминирующим при определении механизма водородного охрупчивания. Тем не менее, такое взаимодействие гораздо менее понятно на фундаментальном уровне, чем поведение водорода в идеальной кристаллической решетке. Такая ситуация обусловлена многообразием и сложностью взаимодействий водорода с дефектами, а также расхождением между теоретическими расчетами и экспериментальными данными, полученными в ходе исследований процесса водородного растрескивания металлических материалов. В последние десятилетия широкий спектр металлов и сплавов был исследован с точки зрения их склонности к водородному растрескиванию. При этом особое место в исследованиях взаимодействия водорода с дефектами кристаллической решетки уделяется взаимодействию водорода с дислокациями. Понимание процесса взаимодействия водорода с дислокациями имеет большое значение из-за влияния указанного взаимодействия на пластические свойства металлов и подвижность водорода. В областях, удаленных от ядра дислокации, энергию взаимодействия водорода с дислокациями обычно рассматривают в рамках механики сплошной

среды. С теоретической точки зрения описание упругой энергии, обусловлено взаимодействием поля напряжений дислокации с полем деформации вокруг атома водорода, растворенного в междоузлии. Напряжения вокруг краевых, винтовых и смешанных дислокаций непрерывно возрастают с приближением к ядру [17, 18], что подразумевает соответствующий диапазон энергий связи. Модель сплошной среды неприменима в ядре дислокации, потому что требует атомистической обработки. Деформация вокруг атомов водорода в ГЦК-металлах имеет кубическую симметрию, поскольку атомы водорода в растворе занимают октаэдрические междоузлия. Ситуация принципиально отличается для ОЦК-металлов, где занятие тетраэдрических междоузлий вызывает тетрагональные искажения. Однако в действительности из экспериментальных данных [17] следует, что тетрагональное искажение отсутствует или очень мало. Следовательно, энергия взаимодействия, будучи в общем случае произведением напряжения и тензора деформации, выражается в виде [3]:

$$\varepsilon = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)V_H}{3}, \tag{1}$$

где V_H – парциальный молярный объем водорода; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Для краевой дислокации можно получить следующее уравнение энергии взаимодействия [19]:

$$\varepsilon = \left(\frac{A}{r}\right) \sin \upsilon, \tag{2}$$

где r – расстояние от ядра дислокации, υ – угол между плоскостью скольжения и позиционным вектором r; A – величина, содержащая упругие постоянные материала вместе с вектором Бюргерса дислокации и парциальным молярным объемом водорода.

Таким образом, локальная энергия для атома водорода зависит от координат r и υ. В случае винтовой дислокации выражение в скобках в формуле (1) равно нулю, и в следствие этого энергия взаимодействия с водородом обычно считается пренебрежимо малой. Это, однако, может представлять собой упрощение, поскольку оно предполагает отсутствие тетрагонального искажения, что не является общепринятым [18, 20], и пренебрегает возможными ловушками в ядре. Локальное заполнение водорода вблизи мест скопления дислокаций определяется статистическим распределением Ферми-Дирака, отражающим возникновение мест заполнения [21]. Из выражения для энергии взаимодействия (2) можно рассчитать распределение энергий узлов $n(\varepsilon)$. Это позволяет сформулировать соотношение между средней концентрацией водорода в решетке (c) и химическим потенциалом водорода (μ):

$$\mu = \mu^0 + \frac{RT}{2} \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P^0_{H_2}}\right), \tag{3}$$

где μ^0 – начальный химический потенциал; P_{H_2} – внешнее давление; $P^0_{H_2}$ – начальное давление;

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{n(\varepsilon)d\varepsilon}{1 + \exp[(\varepsilon - \mu)/kT]}, \tag{4}$$

Для случая, когда почти весь водород захвачен краевыми дислокациями, получаем [2]:

$$\mu - \mu^0 = -\frac{A}{2}\sqrt{\frac{\psi\rho\pi}{c}}, \tag{5}$$

где ψ – концентрация насыщения водорода в окрестности дислокации, ρ – плотность дислокаций.

При наличии больших локальных концентраций водорода вблизи дислокаций в теоретический расчет должно быть включено взаимодействие H-H. В этом случае, предсказанная

сегрегация атомов водорода на дислокациях приводит к протяженным локальным областям высокой концентрации. Образование областей высокой концентрации вносит дополнительные энергетические изменения за счет упругого размещения водородной атмосферы и образования границы между атмосферой и окружающей матрицей. Кроме того, возможна перегруппировка атомов матрицы, приводящая к образованию новой фазы, как это наблюдалось для других растворенных веществ, таких как азот в железе и кислород в кремнии [17].

Подвижность водорода может быть существенно уменьшена благодаря его взаимодействию с дислокациями. Так, водород может быть захвачен включениями, что приводит к увеличению сил сопротивления при движении дислокаций и уменьшению количества водорода в движущейся дислокации, что в свою очередь приводит к уменьшению скорости движения дислокации. Таким образом, распространение трещины может происходить в восприимчивых областях, в которых образуется более острый и более хрупкий наконечник трещины [22, 23]. Кинетика роста трещины будет резко возрастать, если дополнительно будет применяться глобальная нагрузка. Причина заключается в том, что на изменение поведения трещины влияет уменьшение подвижности дислокаций с изменением характеристик скольжения [24].

Скорость движения дислокаций с водородной атмосферой $\bar{v}_{DH}$ может быть выражена соотношением Эйнштейна-Стокса [25]:

$$\bar{v}_{DH} = MF_{dd}, \tag{6}$$

где M – подвижность водородного облака, F_{dd} – сила, движущая дислокацию.

Тогда подвижность водородного облака можно выразить, используя формулу (7)

$$M = \frac{D_{eff}}{kT}, \tag{7}$$

тогда скорость движения дислокации с водородным облаком может быть записана в виде [25]:

$$\bar{v}_{DH} = \frac{D_{eff}}{kT} \times F_{dd}, \tag{8}$$

где D_{eff} – эффективный коэффициент диффузии водорода.

Экспериментальное описание рассматриваемого взаимодействия затруднено из-за малого объема металла, в структуре которого присутствует дефект. Даже при самых высоких плотностях дислокаций $\rho = 10^{11}$см$^{-2}$ ядра обычно насыщаются при средних концентрациях выше 1 ppm (частиц на миллион). Электрохимические исследования водородопроницаемости применимы в этом режиме концентрации и широко используются для наблюдения влияния дислокаций на растворимость и диффузию водорода. Одним из высокочувствительных методов механических исследований водород-дислокационного взаимодействия (особенно при небольших концентрациях водорода) является метод внутреннего трения, который позволяет регистрировать и оценивать фазовые и структурные превращения, происходящие в металлах и сплавах. Исследование зависимостей внутреннего трения (температурных и амплитудных), позволяет с достаточной степенью точности определять параметры дислокационной структуры, особенности металлографической структуры, изменения в концентрации и расположении точечных дефектов. В таких экспериментах высота собственных пиков дислокаций уменьшается за счет добавления водорода, а новый пик (водородный максимум Снука-Кестера) возникает из-за взаимодействия водород-дислокация [26, 27]. Несмотря на то, что интерпретация максимума Снука-Кестера достаточно сложна, метод внутреннего трения остается одним из основных методов исследований кинетики процесса ВР, так как его использование позволяет оценить вклад примесей внедрения (например, C, N, H) в процесс пластификации металла при его деформации [26-28].

3.2. Анализ влияния термической обработки и легирования на чувствительность сталей к коррозионно-механическому разрушению

Проведение большого числа сравнительных испытаний наиболее широко распространенных марок арматурных сталей показало, что при высоком уровне приложенных растягивающих напряжений $(0,9\ldots0,7\sigma_B)$ практически все стали обладают высокой чувствительностью к КМР. Исключение составляют стали 23Х2Г2Т и 35ГС, которые при испытании в водном растворе 8%$\sim H_2SO_4$ с анодной поляризацией при плотности тока $D_A = 3A/\text{м}^2$ при уровне напряжений $0,7\sigma_B$ имеют достаточно высокую стойкость к растрескиванию (более 100 часов). При среднем уровне напряжений $(0,6\ldots0,4\sigma_B)$ стойкость исследуемых сталей при испытаниях в среде, вызывающей ВР практически не меняется, в то время как при испытании в водном растворе 8%$\sim H_2SO_4$ с анодной поляризацией при плотности тока $D_A = 3A/\text{м}^2$ стойкость всех исследуемых сталей значительно возрастает. Несмотря на большую разницу в абсолютных значениях стойкости образцов, испытываемых в различных средах, и характера зависимости времени до разрушения от уровня приложенных напряжений – имеется идентичность в определении порядка стойкости при проведении сравнительных испытаний.

Проведение испытаний по определению длительной прочности различных марок арматурных сталей в средах, вызывающих наводороживание, позволило обнаружить немонотонное изменение стойкости при уменьшении величины растягивающих напряжений. Для проверки и уточнения немонотонной зависимости $\sigma_Э - \tau_P$ были проведены испытания на большем числе образцов, которые показали, что увеличение уровня приложенных растягивающих напряжений приводит к сокращению инкубационного периода развития микротрещин при водородном растрескивании. Зарождение и развитие трещин при этом происходит преимущественно в объеме образца в местах локализации растягивающих напряжений на дефектных участках структуры и субструктуры.

Исследование влияния внутренних и внешних факторов на кинетику процесса КМР позволило установить, что длительная прочность термически упрочненного арматурного проката в значительной степени определяется релаксационной способностью структуры – релаксация остаточных пиковых микронапряжений, локализующихся у границ зерен и субструктурных границ способствует снижению чувствительности к растрескиванию.

Исследование влияния легирования на склонность арматурной стали 35ГС к КМР показало, что низкую чувствительность к растрескиванию стержневой арматуры, изготовленной из стали 35ГС, обеспечивает следующий химический состав: 1) при КРН – 0,28...0,34% C, 0,8...1,2% Mn, 0,6...0,9% Si, и 0,2...0,6% Al; 2) при ВР – 0,31% C, 1,03% Mn, 0,76% Si, 0,01% Al и 0,72% Ti. При этом сталь 35ГС должна прокатываться при обычных условиях прокатки, но с принудительным ограничением температуры конца прокатки после ВТМО или закалкой (870-920°C). Оптимальная температура самоотпуска зависит от количества Al. Для стали 20ГС подвергнутой легированию Zr в количестве 0,0084...0,50% сопротивление КРН достигает максимума при содержании Zr на уровне 0,50%. Исследование комплексного легирования сталей 20ГС, 20ГС2, 22ГСРМ показало, что наибольшую сопротивляемость коррозионно-механическому разрушению показывает сталь 22ГСРМ легированная B (0,52...0,53%) и Mo (0,0020 и 0,0035%).

Для перспективного использования указанных сталей требуются дополнительные исследования влияния химического состава и режимов прокатки на их свойства.

Анализ результатов испытаний на коррозионное растрескивание в растворах нитратов показал, что стержневая арматура периодического профиля из стали 80С в состоянии поставки при механических свойствах класса прочности А600 имеет достаточно высокую стойкость против КРН. Наилучшие коррозионные и механические свойства для арматуры, изготовленной из стали 80С обеспечивают структуры сорбита и тонкого перлита.

Арматура из стали марки 20ХГ2Ц в состоянии поставки при сложившейся технологии

производства отличается большой нестабильностью стойкости против КРН при изменении химического состава (в основном углерода) в пределах марочного. Высокую коррозионную стойкость арматура из стали 20ХГ2Ц имеет только при содержании углерода на нижнем пределе марочного состава, что обеспечивается структурой однородного бейнита при механических свойствах на уровне класса прочности А600.

При более высоких механических свойствах арматура из стали 20ХГ2Ц имеет более низкую коррозионную стойкость.

Исследование влияния химического состава и температуры отпуска на чувствительность стали 23Х2Г2Т к КРН позволило установить, что контролируя химический состав (и прежде всего содержание углерода и хрома) и технологические режимы получения данной стали можно не только резко повысить ее сопротивляемость растрескиванию, но и получить гарантированный комплекс высоких эксплуатационных свойств – механических и коррозионных.

Наибольшую устойчивость против КРН при практически неизменной прочности для арматуры из стали 23Х2Г2Т обеспечивает 2-х часовой отпуск в интервале температур 350...400°С.

Полученные данные об изменении высоты 200° пика на ТЗВТ при отпуске стали 23Х2Г2Т в интервале температур 150...400°С, позволяют предполагать, что снижение чувствительности стали 23Х2Г2Т к КРН при отпуске обусловлено протеканием релаксационных процессов.

Проведенные исследования показывают, что влияние микроструктуры и термической обработки на чувствительность арматурной стали 23Х2Г2Т к КРН в растворах нитратов, сводится к изменению уровня и распределения остаточных напряжений в структуре стали и особенностям распределения примесей внедрения (С и N) по объему зерен.

По-видимому, наличие примесей (С и N) на границах зерен является необходимым условием для возникновения коррозионного процесса, а его скорость определяется напряженным состоянием, способностью структуры к релаксации напряжений и концентрацией агрессивной среды.

Таким образом, для повышения стойкости арматурной стали 23Х2Г2Т к КРН необходимо обеспечивать такой состав и условия термической обработки, в результате которых примеси внедрения (С и N) будут удерживаться преимущественно в объеме зерен, а структура стали будет отличаться однородностью и повышенной стойкостью к релаксации напряжений.

Установлено, что изменение прочности арматурной стали 22Х2Г2АЮ класса прочности А1000 в пределах класса не влияет на ее стойкость против КРН. Отпуск арматуры через 4,5 месяца после прокатки вызывает некоторое повышение ее устойчивости против КРН только при температурах 450°С. Однако при этом наступает сильное разупрочнение стали. Интервал времени до 48 часов между концом прокатки и началом отпуска стали не оказывает заметного влияния на ее стойкость против КРН, несмотря на то, что при этом наблюдается существенное изменение модуля упругости (Е) и ВТ (Q^{-1}), свидетельствующие о протекании необратимых процессов.

Полученные результаты о влиянии уровня прочности, температуры отпуска и интервала времени между концом прокатки и началом отпуска на стойкость против КРН стали 22Х2Г2АЮ следует считать предварительными.

Полученная разница в стойкости против КРН у лабораторных и опытной (промышленной) плавки требует тщательной проверки технологических режимов и дополнительных исследований на нескольких промышленных плавках.

4. Заключение

Разработана методика сравнительных испытаний, которая позволяет достаточно экспрессно определять стойкость против коррозионно-механического разрушения арматурных сталей. Установлено влияние термической обработки на механические и коррозионные свойства ар-

матурного проката. Выявлены кинетические закономерности процессов разрушения высокопрочных сталей в условиях воздействия механических, тепловых, концентрационных полей и агрессивных сред, необходимые для повышения и прогнозирования долговечности арматурного проката из высокопрочных сталей в композиционных железобетонных конструкциях и сооружениях. Предложены физико-химические комплексные методы защиты черных и цветных металлов и сплавов от коррозионно-механического разрушения, которые могут обеспечить повышение долговечности высокопрочных сталей, эксплуатируемых в агрессивных водородсодержащих средах и ресурс композиционных железобетонных конструкций со стальными арматурными стержневыми высокопрочными наполнителями.

Представленные результаты могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих и малопереходных процессов обработки материалов с применением новых нанокомпозиционных смазок и покрытий и учетом рекомендаций работ [29-40].

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашкова Л.В. Фрактально-синергетические аспекты локальной микроповреждаемости и разрушения диффузионно-активированной водородом стали: дис. ...д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / Шашкова Лидия Владимировна. – М., 2014. 336 с.

2. Шаповалов В.И. Легирование водородом.– Днепропетровск: Журфонд, 2013. 385 с.

3. Hirth J.P. Effects of hydrogen on the properties of iron and steel // Metall. Trans. A. – 1980. V. 11A. P. 861-890.

4. Troiano A.R., Hehemann R.F. Stress corrosion cracking of ferritic and austenitic stainless steels / Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking; R. Gibala and R.F. Hehemann (ed.). ASM, 1995. P.231-248.

5. Birnbaum, H.K. Mechanisms of hydrogen related fracture of metals / Hydrogen effects on materials behavior; N.R. Moody and A.W Thompson (eds). – TMS. Warrendale, PA. 1990. P. 639-658.

6. Lynch S.P. Chapter 1: Mechanistic and fractographic aspects of stress-corrosion cracking (SCC) // Stress Corrosion Cracking. Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 3-89.

7. Lynch S.P. Chapter 2: Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms // Stress Corrosion Cracking. Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 90-130.

8. Анализ теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания металлов и сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 3(72). С. 6-33.

9. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 32-47.

10. Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 430 с.

11. ГОСТ Р 9.915-2010. Металлы, сплавы, покрытия и изделия: Методы испытаний на водородное охрупчивание. – М.: Стандартинформ, 2011. 36 с.

12. ASTM F519-17. Standard Test Method for Mechanical Hydrogen Embrittlement Evaluation of Plating/Coating Processes and Service Environments / in: Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.

13. ГОСТ 9.901.1-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание. – М.: Издательство стандартов, 1993. 21 с.

14. ГОСТ 9.901.4-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов при одноосном растяжении. – М.: Издательство стандартов, 1993. 7 с.

15. ГОСТ 9.903-81. Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы высокопрочные. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание. – М.: Издательство стандартов, 1993. 16 с.

16. ГОСТ 25156-82. Металлы. Динамический метод определения характеристик упругости. – М.: Издательство стандартов, 1982. 21 с.

17. Hydrogen interactions with defects in crystalline solids / S. M. Myers, M. I. Baskes, H. K. Birnbaum, J. W. Corbett, G. G. DeLeo, S. K. Estreicher, E. E. Mailer, P. Jena, N. M. Johnson, R. Kirchheim, S. J. Pearton, M. J. Stavola // Rev. Mod. Phys. 1992. Vol. 64. № 2. P. 559-617.

18. Кутепов С. Н. О некоторых аспектах взаимодействия водорода с дислокационными скоплениями в металлах и сплавах // Сб. трудов XIV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». (17–20.10.2017, Москва). – М.: ИМЕТ РАН, 2017. С. 42-44.

19. Kirchheim R., Hirth J.P. Hydrogen adsorption at cracks in Fe, Nb and Pd // Scr. Metall. 1982. Vol. 16. P. 475-478.

20. Zhang T.-Y., Hack J. The equilibrium concentration of hydrogen atoms ahead of a mixed mode I-mode III crack tip in single crystal iron // Metall. Mater. Trans. A. 1999. Vol. 30A. P. 155-159.

21. Hirth J.P., Carnahan B. Hydrogen adsorption at dislocations and cracks in Fe // Acta Metall. 1978. Vol. 26. P. 1795-1803.

22. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. I (ОБЗОР) / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Г. Колмаков, А. Е. Гвоздев // Материаловедение. № 3. 2018. С. 27–33.

23. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. II (ОБЗОР) / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Г. Колмаков, А. Е. Гвоздев // Материаловедение. № 4. 2018. С. 20–29.

24. Nelson H.G. Hydrogen embrittlement // Treatise on Materials Science and Technologie. 1983. Vol. 25. P. 275-359.

25. Tien J.K., Thomson A.W., Bernstein I.M., Richards R.J. Hydrogen transport by dislocation // Metall. Trans. A. 1976. Vol. 7A. P. 821-829.

26. Головин С.А., Головин И.С. Механическая спектроскопия релаксации Снуковского типа // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. №5 (683). С. 3-11.

27. Чуканов А.Н., Яковенко А.А. Роль водорода в деградации и деструкции малоуглеродистых сталей // Известия ТулГУ. Серия: Естественные науки. 2012. Вып. 1. С. 211-219.

28. Чуканов А.Н., Яковенко А.А., Широкий И.Ф. Механическая спектроскопия в изучении субструктурной деградации углеродистых сталей // Вестник ТГУ. 2013. Т. 18. Вып. 4. С. 1625-1626.

29. Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е., Золотухин В.И., Сергеев А.Н., Калинин А.А., Бреки А.Д., Сергеев Н.Н., Кузовлева О.В., Стариков Н.Е., Малий Д.В. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / Тула, Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.

30. Сергеев Н.Н., Гвоздев А.Е., Сергеев А.Н., Бреки А.Д., Калинин А.А., Александров С.Е., Стариков Н.Е., Кузовлева О.В., Малий Д.В., Кутепов С.Н., Цой Е.В., Клементьев Д.С., Соломатникова Е.Б. Ресурсы деформационной способности различных материалов: учебное пособие. – Тула, Изд-во: ТулГУ, 2016. 172 с.

31. Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Колмаков А.Г. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов первого рода // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

32. Gvozdev A.E., Golyshev I.V., Minayev I.V., Sergeyev A.N., Sergeyev N.N., Tikhonova I.V., Khonelidze D.M., Kolmakov A.G. Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. T. 6. № 4. C. 305-310.

33. Gvozdev A.E., Bogolyubova D.N., Sergeev N.N., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Tikhonova I.V. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. T. 6. № 1. C. 32-40.

34. Бреки А.Д., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г. Использование обобщенного треугольника паскаля для описания колебаний силы трения материалов // Материаловедение. 2016. № 11. С. 3-8.

35. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Сапожников С.В., Сергеев А.Н., Колмаков А.Г., Бреки А.Д., Малий Д.В., Добровольский Н.Н. Анализ уравнений теории пластичности порошковых металлических систем // Чебышевский сборник. 2018, 19 (1), С. 152-166. URL: https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-1-152-166

36. Макаров Э.С., Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е., Сапожников С.В., Сергеев А.Н. Свойства уравнений теории пластичности дилатирующих материалов в концепции пластического газа // Чебышевский сборник. 2018, 19 (2), С. 163-171. URL: https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-2-163-171

37. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Сергеев А.Н., Малий Д.В. Применение математического метода локальных вариаций для решения задач пластического формоизменения металлических, порошковыхи нанокомпозиционных материалов // Чебышевский сборник. 2018, 19 (4), С. 43-54. URL: https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-43-54

38. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Сергеев А.Н., Минаев И.В., Бреки А.Д., Малий Д.В. Применение теории пластичности дилатирующих сред к процессам уплотнения порошков металлических систем // Чебышевский сборник. 2017, 8(4), С. 268-284. URL: https://doi.org/10.22405/2226-8383-2017-18-4-268-284

39. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Сапожников С.В. К теоретическому анализу процесса компактирования порошковых материалов прессованием // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017б № 4. С. 273-283.

40. Breki A.D., Aleksandrov S.E., Tyurikov K.S., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO2 with MoS2 nanoparticles under conditions of spinning friction on SHKH15 steel // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. T. 9. № 4. C. 714-718.

REFERENCES

1. Shashkova, L.V., 2014, “Fraktal’no-sinergeticheskie aspekty lokal’noj mikropovrezhdaemosti i razrusheniya diffuzionno-aktivirovannoj vodorodom stali [Fractal-synergetic aspects of local micro-damage and destruction of diffusion-activated hydrogen steel], Moskva, Dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk, Tula, 336 p.

2. Shapovalov, V.I., 2013, “Legirovanie vodorodom” [Hydrogen doping], Dnepropetrovsk, Zhurfond, 385 p.

3. Hirth, J.P., 1980, Effects of hydrogen on the properties of iron and steel, Metall. Trans. A., vol. 11A, pp. 861-890.

4. Troiano, A.R., Hehemann, R.F., 1995, Stress corrosion cracking of ferritic and austenitic stainless steels, Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking, pp. 231-248.

5. Birnbaum, H.K., 1990, Mechanisms of hydrogen related fracture of metals, Hydrogen effects on materials behavior, Warrendale, PA, pp. 639-658.

6. Lynch, S.P., 2011, Chapter 1: Mechanistic and fractographic aspects of stress-corrosion cracking (SCC), Stress Corrosion Cracking. Woodhead Publishing Limited, pp. 3-89.

7. Lynch, S.P., 2011, Chapter 2: Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms, Stress Corrosion Cracking. Woodhead Publishing Limited, pp. 90-130.

8. Sergeev, N.N., Sergeev, A.N., Kutepov, S.N., et al., 2017, “Analiz teoreticheskih predstavlenij o mekhanizmah vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov” [Analysis of theoretical ideas about the mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys], Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, vol. 21, no. 3(72), pp. 6-33.

9. Sergeev, N.N., Kutepov, S.N., Gvozdev, A.E., et al., 2017, “Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov, svyazannye s usileniem dislokacionnoj aktivnosti” [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys associated with increased dislocation activity], Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, vol. 21, no. 2(71), pp. 32-47.

10. Sergeev, N. N., Sergeev, A. N., 2018, “Mekhanicheskie svojstva i vnutrennee trenie vysokoprochnyh stalej v korrozionnyh sredah” [Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosive environments], Tula, Izd-vo TulGU, 430 p.

11. GOST R 9.915-2010, 2011, “Metally, splavy, pokrytiya i izdeliya: Metody ispytanij na vodorodnoe ohrupchivanie” [Metals, alloys, coatings and products: hydrogen embrittlement test Methods], Moskva, Standartinform, 36 p.

12. ASTM F519-17, 2017, Standard Test Method for Mechanical Hydrogen Embrittlement Evaluation of Plating, Coating Processes and Service Environments, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

13. GOST 9.901.1-89, 1993, “Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally i splavy. Obshchie trebovaniya k metodam ispytanij na korrozionnoe rastreskivanie” [Unified system of protection against corrosion and aging. Metals and alloys. General requirements for corrosion cracking test methods], Moskva, Standartinform, 21 p.

14. GOST 9.901.4-89, 1993, “Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally i splavy. Ispytaniya na korrozionnoe rastreskivanie obrazcov pri odnoosnom rastyazhenii” [Unified system of protection against corrosion and aging. Metals and alloys. Tests for corrosion cracking of specimens under uniaxial tension], Moskva, Standartinform, 7 p.

15. GOST 9.903-81, 1993, “Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Stali i splavy vysokoprochnye. Metody uskorennyh ispytanij na korrozionnoe rastreskivanie” [Unified system of protection against corrosion and aging. Steel and alloys high strength. Accelerated Corrosion Cracking Test Methods], Moskva, Standartinform, 16 p.

16. GOST 25156-82, 1982, “Metally. Dinamicheskij metod opredeleniya harakteristik uprugosti” [Metals. Dynamic method of determining the characteristics of elasticity], Moskva, Standartinform, 21 p.

17. Myers, S.M., Baskes, M.I., Birnbaum H.K., et al., 1992, Hydrogen interactions with defects in crystalline solids, Rev. Mod. Phys., vol. 64, no. 2, pp. 559-617.

18. Kutepov, S.N., 2017, “On some aspects of hydrogen interaction with dislocation clusters in metals and alloys” In proceedings of XIV Russian annual conference of young researchers and graduate students “Physics and chemistry and technology of inorganic materials”, Moskva, IMET RAN, pp. 42-44.

19. Kirchheim, R., Hirth, J.P., 1982, Hydrogen adsorption at cracks in Fe, Nb and Pd, Scr. Metall, vol. 16, pp. 475-478.

20. Zhang, T.-Y., Hack, J., 1999, The equilibrium concentration of hydrogen atoms ahead of a mixed mode I-mode III crack tip in single crystal iron, Metall. Mater. Trans. A., vol. 30A, pp. 155-159.

21. Hirth, J.P., Carnahan, B., 1978, Hydrogen adsorption at dislocations and cracks in Fe, Acta Metall, vol. 26, pp. 1795-1803.

22. Sergeev, N.N., Sergeev, A.N., Kutepov, S.N., 2018, “Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov. Ch. I (OBZOR)” [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Part I (REVIEW)], Materialovedenie, no. 3, pp. 27-33.

23. Sergeev, N.N., Sergeev, A.N., Kutepov, S.N., 2018, “Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov. Ch. II (OBZOR)” [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Part II (REVIEW)], Materialovedenie, no. 4, pp. 20-29.

24. Nelson, H.G., 1983, Hydrogen embrittlement, Treatise on Materials Science and Technologie, vol. 25. pp. 275-359.

25. Tien, J.K., Thomson, A.W., Bernstein, I.M., et al., 1976, Hydrogen transport by dislocation, Metall. Trans. A., vol. 7A, pp. 821-829.

26. Golovin, S. A. Golovin, I. S., 2012, “Mekhanicheskaya spektroskopiya relaksacii Snukovskogo tipa” [Mechanical spectroscopy of relaxation Chukovskogo type], Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, no. 5 (683), pp. 3-11.

27. Chukanov, A. N., Yakovenko, A. A., 2012, “Rol’ vodoroda v degradacii i destrukcii malouglerodistyh stalej” [Role of hydrogen in degradation and destruction of low-carbon steels], Tula, Izvestiya TulGU, Seriya: Estestvennye nauki, no. 1, pp. 211-219.

28. Chukanov, A.N., Yakovenko, A.A., Wide, I.F., 2013, “Mekhanicheskaya spektroskopiya v izuchenii substrukturnoj degradacii uglerodistyh stalej” [Mechanical spectroscopy in the study of substructural degradation of carbon steels], Tomsk, Vestnik TGU, vol. 18, no. 4, pp. 1625-1626.

29. Shorshorov, M. H., Gvozdev, A. E., Zolotukhin, I. V., et al., 2016, “Razrabotka progressivnyh tekhnologij polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovyh i kompozicionnyh nanomaterialov” [Development of advanced technologies for production and processing of metals, alloys, powder and composite nanomaterials], Tula, Izd-vo TulGU, 235 p.

30. Sergeev, N. N., Gvozdev, A. E., Sergeev, A. N., et al., 2016, “Resursy deformacionnoj sposobnosti razlichnyh materialov” [Resources strain the ability of different materials], Tula, Izd-vo TulGU, 172 p.

31. Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N., Minaev, I.V., et al., 2015, “Rol’ processa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotoryh fazovyh perekhodov pervogo roda” [The role of the embryo formation process in the development of some first-order phase transitions], Materialovedenie, no. 1, pp. 15-21.

32. Gvozdev, A.E., Golyshev, I.V., Minayev, I.V., et al., 2015, Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets, Inorganic Materials: Applied Research, vol. 6, no. 4, pp. 305-310. URL: https://doi.org/10.1134/S2075113315040115

33. Gvozdev, A.E., Bogolyubova, D.N., Sergeev, N.N., 2015, Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation, Inorganic Materials: Applied Research, vol. 6. no. 1, pp. 32-40. URL: https://doi.org/10.1134/S2075113315010086

34. Brake, A.D., Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., 2016, “Ispol’zovanie obobshchennogo treugol’nika paskalya dlya opisaniya kolebanij sily treniya materialov” [The use of the generalized Pascal triangle to describe the vibrations of the friction force of materials], Materialovedenie, no. 11, pp. 3-8.

35. Makarov, E.S., Gvozdev, A.E., Zhuravlev, G.M., et al., 2018, Analysis of plasticity theory equations of powder metal systems, Chebyshevskii Sbornik, vol.19 (1), pp.152-166. URL: https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-1-152-166

36. Makarov, E.S., Zhuravlev, G.M., Gvozdev, A.E., et al., 2018, The equations of the plasticity theory properties of dilating materials in the concept of plastic gas, Chebyshevskii Sbornik, vol. 19 (2), pp. 163-171. URL: https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-2-163-171

37. Zhuravlev, G.M., Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., et al., 2018, Application of mathematical method of local variations to solve problems of plastic formification of metal, powder and nanocomposition materials, Chebyshevskii Sbornik, vol. 19 (4), pp. 43-54.
URL: https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-43-54

38. Makarov, E.S., Gvozdev, A.E., Zhuravlev, G.M., et al., 2017, Application of plasticity theory of dilating media to sealing processes of powders of metallic systems, Chebyshevskii Sbornik, vol. 18 (4), pp. 268-284. URL: https://doi.org/10.22405/2226-8383-2017-18-4-268-284.

39. Gvozdev, A.E., Zhuravlev, G.M., Sapozhnikov, S.V., 2017, “K teoreticheskomu analizu processa kompaktirovaniya poroshkovyh materialov pressovaniem” [Theoretical analysis of the process of compacting powder materials by pressing], Izvestiya Tul’skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, no. 4, pp. 273-283.

40. Breki, A.D., Aleksandrov, S.E., Tyurikov, K.S., et al., 2018, Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO2 with MoS2 nanoparticles under conditions of spinning friction on SHKH15 steel, Inorganic Materials: Applied Research, vol. 9, no 4, pp. 714-718. URL: https://doi.org/10.1134/S2075113318040081

Получено 27.09.2019 г.
Принято в печать 12.11.2019 г.