

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-35-52>

Морфология объёмных зон пластичности у газонаполненных пор в литых и порошковых сталях в условиях стресс-коррозии

А. Н. Чуканов¹, В. А. Терешин¹, А. Е. Гвоздев¹, С. Н. Кутепов¹,
А. Н. Сергеев¹, Е. В. Агеев²✉, А. А. Яковенко³

¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

³ ООО «Металлург-Туламаш»
ул. Мосина, 2, г. Тула, 300002, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью настоящей работы являлась разработка метода расчета параметров объёмных зон пластичности в порошковых и литых сталях, развивающихся в окрестности пор под действием внешнего растягивающего напряжения и внутреннего давления газов.

Методы. Задачу решали на базе анализа распределения компонент тензора напряжений в окрестностях несплошностей (пор) различной формы. Поэтапно рассматривали образец, находящийся под действием растягивающих напряжений (σ) и содержащий единственный концентратор напряжения – сферическую пору радиусом «а», а также пору в форме двояковыпуклой линзы. Выбор морфологии пор был обусловлен их экспериментальным наблюдением в структуре реальных промышленных сталей, а также наличием решения для оценки поля напряжений около сферической поры, выполненного Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем. По сравнению с такими концентраторами напряжений, как узкая трещина или пора в виде двояковыпуклой линзы, концентрация напряжений около сферической поры выражена слабее. Однако для процессов диффузии атомов через зону повышенных напряжений важна не только величина напряжения, но и размер самой зоны. Около сферической полости размер перенапряженной зоны наибольший, поэтому анализ её морфологии был взят за основу. В работе использовали моделирование функций, описывающих распределение напряжений около поры по аналогии с полем скоростей идеальной жидкости.

Результаты. Как объёмный объект описанные зоны пластичности представляют собой поверхности сфероида и эллипсоида, окружающие сферические и линзообразные поры. Очевидно, что чем меньше отношение h/l для поры, тем дальше в поперечном направлении распространяется зона пластичности (больше $\rho_{max} - l$), становясь при этом всё более узкой (z_1 примерно пропорциональна h). В качестве характерных геометрических параметров зон пластичности около линзообразной поры были определены: её наибольшая протяжённость в радиальном направлении от вершины; характерная толщина зоны ($\rho_{max} - l$)/а; площадь линзы; объём зоны и его доля от объёма линзы. Развитие зон пластичности около пор различной морфологии в сталях в условиях стресс-коррозии стимулирует изменение (рост) кинетических характеристик металла и создание благоприятных условий для ускоренной диффузии (обезуглероживания). В области зон пластичности в окрестностях пор под действием внешнего и внутреннего (давление газов) напряжений создание каналов облегченной диффузии формирует в точках D, B и C очаги зарождения субмикротрещин. Образующиеся в радиальных направлениях ювенильные свободные поверхности создают зоны реализованных аккомодационных возможностей среды – зоны пластичности. Вместе с ростом радиальных трещин к их вершинам от поры, находящейся под высоким давлением, ускоренно диффундируют газы.

© Чуканов А. Н., Терешин В. А., Гвоздев А. Е., Кутепов С. Н., Сергеев А. Н., Агеев Е. В., Яковенко А. А., 2019

Заключение. Предложенный в работе алгоритм анализа распределения напряжений позволяет прогнозировать интенсивность развития зон пластичности (трещинообразования) в зависимости от соотношения параметров β ($\beta = \sigma_T / \sigma$) и s ($s = p / \sigma$), то есть от соотношения величин внешнего напряжения, предела текучести стали и давления газов в поре. Сделанный расчет позволил уточнить место зарождения, форму и масштаб развития зон пластичности (трещинообразования) в окрестностях пор различной морфологии в зависимости от соотношения внешнего напряжения и давления газов в порах.

Ключевые слова: стали; растяжение; замедленное разрушение; порообразование; зона пластичности; тензор напряжений; функции комплексных переменных.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Для цитирования: Морфология объёмных зон пластичности у газонаполненных пор в литых и порошковых сталях в условиях стресс-коррозии / А. Н. Чуканов, В. А. Терешин, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, Е. В. Агеев, А. А. Яковенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 35-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-35-52>.

Статья поступила в редакцию 25.07.2019

Статья подписана в печать 04.09.2019

Статья опубликована 25.10.2019

The Morphology of the Volume Plasticity Zones at the Gas-Filled Pores in Cast and Powder Steels under Stress Corrosion

Alexander N. Chukanov¹, Valery A. Tereshin¹, Alexander E. Gvozdev¹,
Sergey N. Kutepov¹, Alexander N. Sergeev¹, Evgeny V. Ageev² ✉,
Alexandra A. Yakovenko³

¹ Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ LLC "Metallurg-Tulamash"
2 Mosina str., Tula 300002, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this work is to develop a method for calculating parameters of volumetric zones of plasticity in powder and cast steels, occurring in the vicinity of pores under external tensile stress and internal gas pressure.

Methods. The problem was solved on the basis of the analysis of the distribution of stress tensor components in the vicinity of discontinuities (pores) of different shapes. A sample under tensile stresses (σ), containing a single stress raiser - a spherical pore with radius "a", and a pore in the form of a biconvex lens, was studied stepwise. The choice of pores morphology was determined by their experimental observation in the structure of real commercial steels, and the presence of a solution for estimating the stress field near the spherical pore, performed by L. D. Landau and E. M. Lifshitz. In comparison with such stress raisers as a tight crack or a pore in the form of a biconvex lens, the stress concentration near a spherical pore is weaker. However, for the processes of diffusion of atoms through the zone of increased stress, not only the intensity of stress is important, but also the size of the zone itself. Near the

spherical cavity, the size of the overstressed zone is the largest, so the analysis of its morphology was taken as a basis. In this paper, we used the modeling of functions describing the stress distribution around the pores similarly to the velocity field of an ideal fluid.

Results. As a volume object, the described zones of plasticity are the surfaces of a spheroid and an ellipsoid surrounding spherical and lenticular pores. It is obvious that the smaller the ratio h/l for the pore is, the further in the transverse direction the plasticity zone (more than p_{max-l}) spreads, becoming tighter and tighter (z_1 is approximately proportional to h). The following geometric parameters of the plasticity zones near the lenticular pore were determined as characteristic ones: its greatest length in the radial direction from the apex; the characteristic thickness of the zone (ρ_{max-l}/a); the area of the lens; the volume of the zone and its share of the volume of the lens. The development of plasticity zones near pores of different morphologies in steels under stress-corrosion conditions stimulates the change (increase) of the kinetic characteristics of the metal and the creation of favorable conditions for accelerated diffusion (decarburization). In the area of plasticity zones in the vicinity of pores under external and internal (gas pressure) stresses, the creation of channels of facilitated diffusion forms places of nucleation of submicrocracks at points D, B and C. Juvenile free surfaces formed in radial directions create zones of realized accommodation opportunities of the medium - zones of plasticity. Along with the growth of radial cracks to their tops from the pore under high pressure, gases diffuse rapidly.

Conclusion. The stress distribution analysis algorithm proposed in this paper allows predicting the intensity of plasticity zones (crack formation) development depending on the ratio of parameters β ($\beta = \sigma_T / \sigma$) and s ($s = p / \sigma$), that is, on the ratio of external stress values, steel yield stress and gas pressure in the pore. The calculation made it possible to clarify the place of nucleation, the shape and scale of the development of zones of plasticity (cracking) in the vicinity of pores of different morphology depending on the ratio of external stress and gas pressure in the pores.

Keywords: steel; tensile; delayed fracture; pore formation; zone of plasticity; stress tensor; complex-variable functions.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Financing: The work was carried out for Project No. 11.6682.2017 / 8.9.

For citation: Chukanov A. N., Tereshin V. A., Gvozdev A. E., Kutepov S. N., Sergeev A. N., Ageev E.V., Yakovenko A. A. The morphology of the volume plasticity zones at the gas-filled pores in cast and powder steels under stress corrosion. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 35-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-35-52>.

Received 25.07.2019

Accepted 04.09.2019

Published 25.10.2019

Введение

Последствием температурно-силового воздействия на структуру литых, порошковых железоуглеродистых композиций и сплавов при их контакте с агрессивными средами является формирование газонаполненных несплошностей (пор, трещин). Образование несплошностей в литых и порошковых сталях при высоких температурах и давлениях в присутствии водорода хо-

рошо известно. Порообразование существенно влияет на уровень физико-механических свойств порошковых композиций при их селективном спекании лучом лазера в условиях аддитивных технологий. Однако морфология зон пластичности в окрестностях пор, определяющая изменение структуры и свойств литых и порошковых сталей, требует более глубокого изучения. Контакт с агрессивными средами в ходе механического нагружения усложняет

эволюцию развивающихся несплошностей (пор), ведет к накоплению в них газов (например, водорода) и увеличению внутреннего давления [1, 2]. В результате вокруг поры формируется область повышенных напряжений. Наличие градиента таких напряжений, усиленного внешними растягивающими напряжениями в окрестностях такой области, стимулирует процесс их перераспределения и ускоряет диффузию к концентраторам примесей внедрения (водорода и углерода) из окружающей матрицы [3]. Водород под действием напряжений транспортирует атомы углерода к перенапряженным микрообъемам [4]. Создаваемые водородные потоки диспергируют цементитные частицы, а также «вымывают» углерод из феррита [5]. Кроме того, в порах происходит взаимодействие водорода и углерода с образованием метана, дополнительно увеличивающего давление в порах [6]. Описанные процессы ведут к обезуглероживанию прилегающих к порам областей. По данным рентгеноструктурного и дюрOMETрического анализов [7] феррит в обезуглероженных микрообъемах подвергается наклёпу. Это ведет к формированию радиальных, а затем и кольцеобразных (сферических) трещин, окружающих пору.

Развитие радиальных и сферических трещин в сталях у пор иллюстрирует перераспределение и аккомодацию накопленных в их окрестностях напряжений [1]. Эти процессы порождают в указанных микрообъемах зоны пла-

стичности. Механизм формирования объёмных зон пластичности около газонаполненных пор в железоуглеродистых композициях и сплавах, подвергаемых стресс-коррозии, отсутствует. Образование таких зон у концентраторов играет существенную роль в ускорении диффузионных процессов и развитии замедленного разрушения. Изучение и прогнозирование механизма зарождения и развития зон пластичности является важным для научного анализа и эксплуатации как порошковых композиций, так и литых сталей.

Целью настоящей работы являлась разработка метода расчета параметров объёмных зон пластичности в порошковых и литых сталях, развивающихся в окрестности пор под действием внешнего растягивающего напряжения и внутреннего давления газов.

Материалы и методы

Задачу решали на базе анализа распределения компонент тензора напряжений в окрестностях несплошностей (пор) различной формы. Поэтапно рассматривали образец, находящийся под действием растягивающих напряжений (σ) и содержащий единственный концентратор напряжения – сферическую пору радиусом «а», а также пору в форме двояковыпуклой линзы. Выбор морфологии пор был обусловлен их экспериментальным наблюдением в структуре реальных промышленных сталей, а также наличием решения для оценки поля напряжений около сферической поры, выполненного Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем [8]. По сравнению с

такими концентраторами напряжений, как узкая трещина или пора в виде двояковыпуклой линзы, концентрация напряжений около сферической поры выражена слабее. Однако для процессов диффузии атомов через зону повышенных напряжений важна не только величина напряжения, но и размер самой зоны. Около сферической полости размер перенапряженной зоны наибольший [9], поэтому анализ её морфологии был взят за основу.

Наиболее разработанные методики решения поставленной цели относятся к аппарату теории функций комплексных переменных [10]. В представленной работе использовали моделирование функций, описывающих распределение напряжений около поры по аналогии с полем скоростей идеальной жидкости. Эти функции σ_{zz} , $\sigma_{z\rho}$, $\sigma_{\rho\rho}$, (z и ρ – координаты в цилиндрической системе с началом в центре поры (рис. 1)).

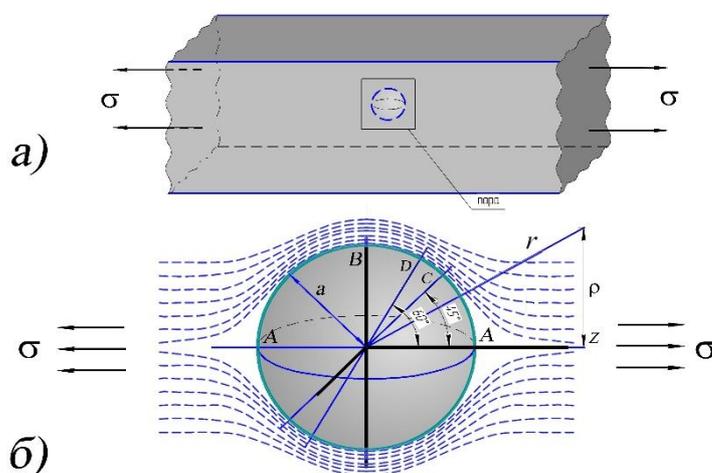


Рис. 1. Сферическая пора в растянутом образце (а); цилиндрические координаты и характерные точки (А, В, С, D) поверхностей зон пластичности (б)

Fig. 1. Spherical pore in a tensile sample (a); cylindrical coordinates and characteristic points (A, B, C, D) of the surfaces of plasticity zones (b)

Считали, что у поверхности поры нормальная проекция вектора силы взаимодействия между двумя соседними элементами среды равна нулю. В терминах теории функций комплексных переменных решаемая задача аналогична описанию потенциального обтекания идеальной жидкостью поверхности твёрдого тела. Вместо силы использовали скорость частицы жидкости. Вектор скорости частицы жидкости на по-

верхности твёрдого тела направлен по касательной к ней. Ближайшие к поверхности линии тока проходят по самой поверхности. При рассмотрении упруго напряжённого состояния металлической среды в данной работе в качестве аналога линии тока использовали термин «силовая линия». Под ним понимали линию, касательная к которой в каждой её точке совпадает с направлением максимальной силы взаимодей-

ствия между соседними элементами среды. Ввели также функции φ (потенциал) и ψ (аналог функции тока).

Описанный подход предварительно применили для оценки распределения напряжений около поверхности поры в форме цилиндра (цилиндрическая пора) в образце, подвергнутом одноосному растяжению в ходе наводороживания.

Длину цилиндра принимали много больше его диаметра. Точка наблюдения была далека от торцов цилиндра. Решали плоскую задачу: второй координатой (помимо z) являлась координата « y », определяющая расстояние от точки наблюдения до плоскости, содержащей ось z и ось цилиндра (рис. 2).

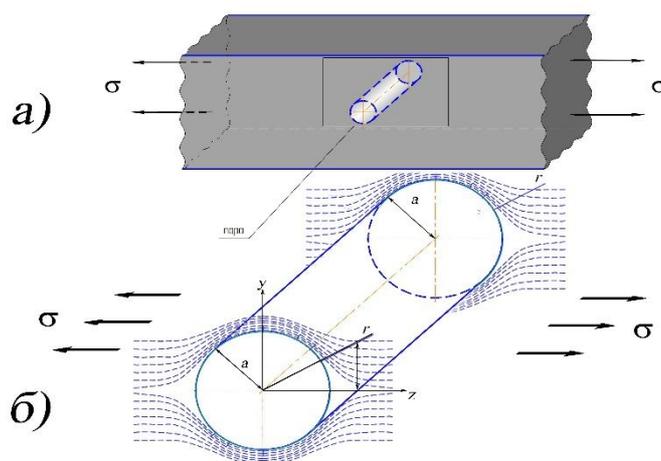


Рис. 2. Цилиндрическая пора в растянутом образце (а); планарные координаты в сечении поры (б)

Fig. 2. A cylindrical pore in a tensile sample (a); planar coordinates in the pore section (б)

$$\sigma_{zz} = \sigma \left[1 + \frac{a^2(y^2 - z^2)}{r^2} \right]; \sigma_{zy} = \sigma \frac{-2a^2 zy}{r^4}.$$

Функции $\sigma_{zz}(z,y)$ и $\sigma_{zy}(z,y)$ подчиняются условию равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} = 0.$$

Компоненту тензора напряжений σ_{yy} определяли с помощью дополнительного условия равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0.$$

Для σ_{yy} получили выражение

$$\sigma_{yy} = \sigma \left[\text{const}(z) - \frac{a^2(y^2 - z^2)}{r^4} \right].$$

Результаты и их обсуждение

Определение компонент тензора напряжений в окрестностях поры в форме двояковыпуклой линзы

Учитывали, что, наряду с объёмом и поверхностью заметную роль в окрестностях таких пор могут играть их заострённый край (рис. 3).

На большом удалении от центра линзы силовая линия проходит по прямой на расстоянии « b » от оси линзы. Вблизи вершины и за ней форма этой условной линии близка к окружности с центром в точке O . В отличие от неё, истинная силовая линия возле края лин-

зы проходит ниже. На большом удалении от поры истинная (5 на рис. 3) и условная (4 на рис. 3) силовые линии совпадают. Расстояние « b » от линии до оси z (прицельное расстояние) есть параметр, фигурирующий в уравнениях обеих линий.

Уравнение истинной силовой линии описывает связь между ρ и z в виде

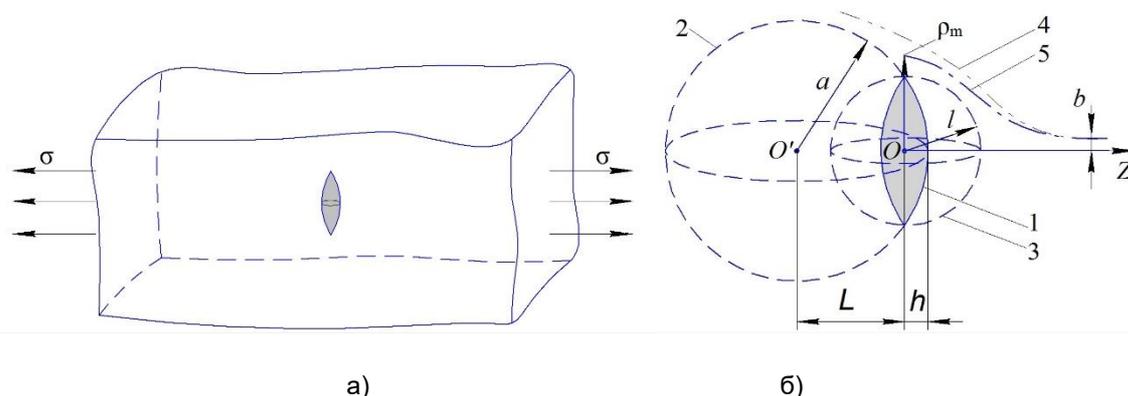


Рис. 3. Пора в образце (а). Поэтапное представление поры в форме двояковыпуклой линзы (1) в виде сферических пор радиуса « a » (2) и « l » (3). Условная (4) и истинная (5) силовые линии (б)

Fig. 3. A pore in the sample (a). Step-by-step representation of the pore in the form of a biconvex lens (1) as spherical pores of radius "a" (2) and "l" (3). Datum (4) and true (5) force lines (б)

Здесь и далее под σ_{zz} и $\sigma_{z\rho}$ понимали приведённые величины, то есть, результаты деления истинных величин на величину внешнего напряжения σ . Уравнение условной линии (или реальной линии при $z > h$) имеет вид $\rho_a = \rho_a(z, a, b)$ в уравнении

$$b^2 = \rho_a^2 \left[1 - \frac{a^4}{(\rho_a^2 + L_z^2)^2} \right], (L_z = L + z). \quad (2)$$

Функция ρ_a задана в неявном виде. При установлении вида зависимости использовали результаты мысленного эксперимента, когда силовые линии проходят мимо сферической полости радиусом $a = l$. Силовая линия с при-

$\rho = \rho(z, a, b)$, (ρ, z – координаты в цилиндрической системе, « a » и « b » – параметры). С помощью функции $\rho(z, b)$ компоненты тензора напряжений σ_{zz} и $\sigma_{z\rho}$ определяются следующим образом:

$$\sigma_{z\rho}^{-1} = \frac{\partial \rho^2}{\partial b^2} = \frac{\rho}{b} \frac{\partial \rho}{\partial b}; \sigma_{zz}^{-1} = \frac{\rho}{b} \frac{\partial z}{\partial b}. \quad (1)$$

цельным расстоянием b пересекает плоскость $z = 0$ на расстоянии ρ_1 от центра сферы, причём, согласно ранее полученному результату [11],

$$b^2 = \rho_1^2 \left[1 - \frac{l^4}{\rho_1^4} \right].$$

Предполагали, что в случае сферической линзы того же габарита l силовая линия с параметром b пересечёт плоскость $z = 0$ на расстоянии от центра, не превышающем ρ_1 . Величина ρ_1 является первой приближительной оценкой ρ_m . Дальнейшее уточнение основывали на том, что край поры – двояковыпуклой линзы сильнее концентрирует

силовые линии нежелезистый край поры – сферы. При этом использовали схему мысленного эксперимента, когда силовая линия « b » встречает на своём пути сферическую пору радиусом « a » ($a^2 = l^2 + L^2$). Искривление первоначально прямой силовой линии начинается у полюса сферической поверхности радиусом « a ». В итоге, для ρ_m получили выражение

$$\rho_m^2 = l^2 + b^2 + \frac{l^2}{2a^2}b^2 + Bb^4, \quad (3)$$

$$B = \frac{3l^2L^2 + a^4}{8l^2a^4}.$$

При опоре на этот результат были получены приблизительные формулы, описывающие поле напряжений около сферической линзы. При этом рассуждали следующим образом. Для истинной функции силовой линии $\rho = \rho(z, a, b)$ можно записать

$$\rho = \rho_a - S(z, b).$$

О вспомогательной функции $S(z, b)$ считали известным следующее:

$$z = 0, S = \rho_b - \rho_m = f_{(b)}, \quad (4)$$

$$S = f_{(b)}g.$$

Функция g – безразмерная. График её – ниспадающая линия, имеющая горизонтальные касательные в точке $z = 0$ и в бесконечно удалённой точке.

При малых z ($z \ll h$) можно записать

$$\rho = \rho_m + \frac{d^2\rho}{dz^2} \Big|_0 z^2$$

(в точке $z = 0$ первая производная равна нулю).

Применяя правило

$$\sigma_{zz}^{-1} = \frac{\rho}{b} \frac{d\rho}{db} \Big|_z,$$

получим для σ_{zz} в точке $z = 0, \rho = l$

$$z = 0, \sigma_{zz}^{-1} = \frac{l^2}{2a^2}, \dots, \sigma_{zz} = \frac{2a^2}{l^2}. \quad (5)$$

На основании этого результата считали, что в точке $z = 0, \rho = l$ (вершина профиля линзы) величина σ_{zz} будет превышать в a^2/l^2 раз таковую в случае, когда вместо линзы будет сфера радиусом « a » (и точка $z = 0, \rho = l$ есть обычная точка сферы). Аналогичные рассуждения применяли и к другим точкам окрестности $z = 0, \rho = l$.

Представим, что вначале в нагруженном образце имеется полость в виде сферы радиусом l . Функции σ_{zz} и σ_{zp} при этом имеют вид:

$$\sigma_{zz}^{(o)} = 1 + \frac{l^4(\rho^2 - z^2)}{(\rho^2 + z^2)^3}; \dots \quad (6)$$

$$\sigma_{zp}^{(o)} = \frac{l^4 2\rho z}{(\rho^2 + z^2)^3}.$$

(символом « o » отмечен случай сферической поры).

При этом, в соответствии с формулами (6) в точке $z = 0, \rho = l$ получим $\sigma_{zz}^{(o)} = 2, \sigma_{zp}^{(o)} = 0$; а в точке $z = l, \rho = 0$ обе эти величины равны нулю.

Далее сферическая пора « l » эволюционирует в линзу с параметрами l (внешний радиус), h (полутолщина в центре), « a » (радиус кривизны поверхности). Допускаем, что для такого объекта в точке $z = 0, \rho = l$ результатом будет $\sigma_{zz} = 2a^2/l^2 = 2(1 + L^2/l^2), (L^2 = a^2 - l^2)$.

Второе допущение состоит в том, что в точке, являющейся полюсом поверхности (как сферической, так и линзообразной поры) величины σ_{zz} и σ_{zp}

должны равняться нулю. В новой ситуации («линза l, h ») это должно происходить при $z = h$.

При синтезе обеих описанных допущений, в отношении общей формулы для σ_{zz} или σ_{zp} приняли следующее: 1) при $L = 0, l = \ll a \gg$ и малых z она должна иметь вид (6); 2) при $L \neq 0, l < a$ и z , близких к h она должна иметь вид

$$\sigma_{zz} = 1 + \frac{(l^2 + L^2)^2 [\rho^2 - (L + z)^2]}{[\rho^2 + (L + z)^2]^3}$$

(это выражение можно получить из (1) и (2), считая $\rho = \rho_a$).

Исходя из этих соображений, для σ_{zz} было получено выражение

$$\sigma_{zz} = 1 + \frac{A_{(z)} [\rho^2 - Z_{(z)}^2]}{[\rho^2 + Z_{(z)}^2]^3}. \quad (7)$$

Здесь $A_{(z)}$ – переходная функция от начального значения A_0 $\beta_0 l^4 = a^2 l^2$ к значению $A_1 = a^4$ при $z = h$; $Z_{(z)}$ – функция z , описывающая переход от z при $z \ll h$ к $L + z$ при $|z - h| \ll h$.

При использовании уравнения (7) и условия равновесия

$$\partial \sigma_{zz} / \partial z + (1/\rho)(\rho \sigma_{zp}) / \partial \rho = 0 \quad (8)$$

для σ_{zp} получаем:

$$\sigma_{zp} = \frac{-2A\rho Z Z_z'}{(\rho^2 + Z^2)^3} + \frac{A_z' \rho}{2(\rho^2 + Z^2)^2} + \frac{f}{\rho},$$

где $Z_z' = dZ/dz, A_z' = \partial A / \partial z, f$ – постоянная интегрирования (может быть функцией z).

Постоянная f принята равной нулю, как это имеет место в аналогичном хрестоматийном случае $l = a, L = 0$. Выражение для σ_{zp} можно упростить и дальше, воспользовавшись некоторой сво-

бодой подбора функций Z и A , в частности потребовав для них соотношения

$$\frac{A_z'}{A} = \frac{4Z(Z_z' - 1)}{\rho^2 + Z^2}, \quad (Z_z' = dZ/dz). \quad (9)$$

В этом случае функция σ_{zp} будет выглядеть как

$$\sigma_{zp} = \frac{-2AZ\rho}{(\rho^2 + Z^2)^3}. \quad (10)$$

Функция A должна быть решением уравнения (9). При численном решении уравнения функция Z моделировалась выражением

$$Z = hx + L2^n x^n / (1 + x)^n, \quad (11)$$

где $x = z/h, n = 2hB/(1-B)L$, а B есть выражение

$$B = (\ln A_1 - \ln A_0) / [\ln(\rho^2 + a^2) - \ln \rho^2]. \quad (12)$$

Рабочая формула для A имеет вид

$$\ln(A/A_0) = Bx \ln(1 + Z^2/\rho^2). \quad (13)$$

Итоговые формулы для σ_{zz} и σ_{zp} имеют вид (7) и (10). Формулы (11), (12), (13) являются вспомогательными.

В случае, когда полость имеет форму сферы, величины « a » и « h » совпадают, поэтому при $z = 0, b \rightarrow 0, \rho \rightarrow 1$ будет $\sigma_{zz} = 2$. Чем острее кромка полости в виде двояковыпуклой линзы (чем больше a/l), тем больше σ_{zz} .

Обсуждение результатов

При выяснении геометрии границы зон пластичности около полостей, необходимо рассмотреть главные слагаемые, входящие в левую часть критерия пластичности Губера – Мизеса. Речь должна идти только о точках области,

окружающей кромки линзы. К главным слагаемым были отнесены σ_{zz}^2 и $3\sigma_{z\rho}^2$. Слагаемые $\sigma_{\rho\rho}\sigma_{zz}$ и $\sigma_{\rho\rho}^2$ можно считать поправочными, так как по оценкам максимальная величина $\sigma_{\rho\rho}$ составляет лишь несколько процентов от величины $(\sigma_{zz})_{\max}$. В общем виде уравнение по условию пластичности записали как

$$\sigma_{zz}^2 + 3\sigma_{z\rho}^2 = (\sigma_T/\sigma)^2 = \beta^2, \quad (14)$$

где σ_T – предел текучести при растяжении; $\sigma_T/\sigma = \beta$ – приведённый к внешнему напряжению предел текучести.

Сказанное относится к случаям, когда между параметрами полости « l » и « a » нет сильного неравенства.

Комбинируя уравнение (14) с формулами (7) и (10), можно привести его к виду:

$$3\left(\frac{\rho^2 + Z^2}{\rho^2 - Z^2}\right)^2 (\sigma_{zz} - 1)^2 + 2(\sigma_{zz} - 1)(2 - \sigma_{zz}) = \beta^2 - 1. \quad (15)$$

Уравнение (14) или (15) с сопутствующими ему формулами (9), (12), (13) - (16) можно решить численно. Помимо этого, можно дополнительно указать характерные точки граничной поверхности зон пластичности. Проще всего это можно сделать для случая $\beta = 2$.

Первой такой точкой является точка зоны, наиболее удалённая от поверхности линзы. Координаты её – $z = 0$, $\rho = \rho_{\max}$. Последняя определяется из равенства (вырожденного уравнения (14) как: $z = 0$, $\sigma_{zz} = \beta$, $\rho_m = [a^2 l^2 / (\beta - 1)]^{1/4}$. При $\beta = 2$ получаем $\rho_{\max} = (al)^{1/2}$.

Ещё одной характерной точкой является точка, находящаяся на линии пересечения граничной поверхности зоны пластичности и плоскости $\rho = 1$. Координата этой точки – z_1 .

Третьей характерной точкой можно считать крайнюю точку зоны пластичности на поверхности полости. Координаты точки – z_r , ρ_r .

В табл. 1 показаны результаты вычислений для величин ρ_{\max}/a ; ρ_{\max}/l ; z_1 ; z_1/h ; z_r , ρ_r при разных l/a .

Для последующего сопоставления с экспериментальными данными был сделан переход на базовые величины l и h (вместо a и l), что осуществлено в третьей и пятой строках табл. 1.

В табл. 2 приведены размеры (в микронах) зон пластичности около пор при разных значениях l (продольный размер) и h/l (форма поры).

Таблица 1

Параметры пор (результаты вычислений) для разных l/a

Table 1

Pore parameters (calculation results) for different l/a

l/a	0,8	0,707	0,6	0,5
ρ_{\max}/a	0,895	0,841	0,775	0,707
ρ_{\max}/l	1,118	1,189	1,291	1,414
z_1/a	0,158	0,142	0,117	0,103
z_1/h	0,395	0,485	0,587	0,760
z_r/a	0,226	0,154	0,09	0,065
ρ_r/a	0,555	0,508	0,456	0,37
ρ_r/l	0,694	0,718	0,760	0,740

Таблица 2

Количественная оценка размеров пластической зоны около полости при разных значениях l и h ^{*)}

Table 2

Quantitative estimation of the plastic zone size near the cavity at different values of l and h ^{*)}

h/l	0,5	0,4085	0,3335	0,268
$\rho_{max} - l$, МКМ	1,18	1,89	2,91	4,14
	5,9	9,45	14,6	20,7
	11,8	18,9	29,1	41,4
z_l , МКМ	1,98	1,98	1,96	2,04
	9,9	9,9	9,8	10,2
	19,8	19,8	19,6	20,4
$l - \rho_r$, МКМ	3,06	2,82	2,40	2,6
	15,3	14,1	12,0	13,0
	30,6	28,2	24,0	26,0

^{*)} Данные в микронах для зоны пластичности около пор при разных значениях l и h . Цифры в строчках по порядку сверху-вниз относятся к случаям $l = 10$ мкм, 50 мкм и 100 мкм, соответственно. Цифры в верхней строке соответствуют цифрам $l/L = 4/3 \dots 1 \dots 3/4 \dots 1/3^{1/2}$, получаемым из верхней строки табл. 2.

Выводы

1. Как объёмный объект описанные зоны пластичности представляют собой поверхности сфероиды и эллипсоиды, окружающие сферические и линзообразные поры. При l/a , близких к единице (например, в случае $l = 0,8a$), сечение такой поры близко к сечению, полученному ранее [11] для случая пор сферической формы (формально это случай $l/a = 1$, $h/a = 1$). Очевидно, что чем меньше отношение h/l для поры, тем дальше в поперечном направлении распространяется зона пластичности (больше $\rho_{max} - l$), становясь при этом всё более узкой (z_l примерно пропорциональна h).

2. В качестве характерных геометрических параметров зон пластичности около линзообразной поры были определены: 1) её наибольшая протяжён-

ность в радиальном направлении от вершины, а также её доля от длины $l - (\rho_{max} - l)$ и $\rho_{max}/l - 1$; 2) характерная толщина зоны $(\rho_{max} - l)/a$; 3) площадь линзы, закрываемая зоной ($2\pi a z_r$), и её доля $\varepsilon = z_r/h$ от площади поверхности линзы; 4) объём зоны и его доля от объёма линзы $2\pi l z [0,5\pi(\rho_{max} - l) + l - \rho_r]$ и $\frac{2lz}{h} \frac{0,5\pi(\rho_{max} - l) + l - \rho_r}{l^2 - Lh - 0,333h^2}$.

3. Развитие зон пластичности около пор различной морфологии в сталях в условиях стресс-коррозии стимулирует изменение (рост) кинетических характеристик металла и создание благоприятных условий для ускоренной диффузии (обезуглероживания). В области зон пластичности в окрестностях пор под действием внешнего и внутреннего (давление газов) напряжений создание каналов облегченной диффузии [2] фор-

мирует в точках D , B и C очаги зарождения субмикротрещин. Образующиеся в радиальных направлениях ювенильные свободные поверхности создают зоны реализованных аккомодационных возможностей среды – зоны пластичности. Вместе с ростом радиальных трещин к их вершинам от поры, находящейся под высоким давлением, ускоренно диффундируют газы. Считали, что образование кольцеобразных трещин на периферии поры является результатом концентрации напряжений на сферическом фронте встречных газовых потоков: водорода извне и газов от поры [11].

4. Предложенный в работе алгоритм анализа распределения напряже-

ний позволяет прогнозировать интенсивность развития зон пластичности (трещинообразования) в зависимости от соотношения параметров β ($\beta = \sigma_T / \sigma$) и s ($s = p / \sigma$), то есть от соотношения величин внешнего напряжения, предела текучести стали и давления газов в поре. Сделанный расчет позволил уточнить место зарождения, форму и масштаб развития зон пластичности (трещинообразования) в окрестностях пор различной морфологии в зависимости от соотношения внешнего напряжения и давления газов в порах.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [12-26].

Список литературы

1. Development of Damage and Decarburization of High-Strength Low-Alloy Steels Under Hydrogen Embrittlement / N.N. Sergeev, A.N. Chukanov, V.P. Baranov, A.A. Yakovenko // Metal Science and Heat Treatment. 2015. Vol. 57. № 1. P. 63-68.

2. Взаимосвязь повреждаемости и перераспределения примесей внедрения в конструкционных сталях при деформации и коррозионном воздействии / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, А.А. Яковенко, И.М. Леонтьев // Деформация и разрушение. 2015. № 6. С.37-42.

3. Давыдов Ю.И., Агеев В.С., Сергеев Н.Н. Обезуглероживание стали в агрессивной среде // Технология машиностроения. 1974. Вып. 35. С. 145-152.

4. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 217 с.

5. Chukanov A.N., Levin D.M., Yakovenko A.A. Use and Prospects for the Internal Friction Method in Assessing the Degradation and Destruction of Iron-Carbon Alloys // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2011. Vol. 75. № 10. P. 1340-1344. ISSN1062-8738.

6. Термодинамическое обоснование «метанового» механизма деструкции упрочненных конструкционных сталей при электролитическом наводороживании под напряжением / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, Р.Н. Ростовцев, А.А. Яковенко, И.М. Леонтьев // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 10. С. 32–39.

7. Обезуглероживание, водородная хрупкость и старение высокопрочных сталей в условиях электролитического наводороживания / И.М. Леонтьев, А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, А.А. Яковенко // «XXI Петербургские Чтения по проблемам прочности: матер. межд. конф. (15-17.04. 2014 г.). СПб., 2014. С. 194-197.

8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. Т. VII. Теория упругости. М.: Наука, Гл. ред. физматлитературы, 1982. 248 с.

9. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Metallurgy, 1984. 280 с.

10. Свешников А.Г., Тихонов А.Н. Теория функций комплексной переменной. М.: Физматлит, 2010. 336 с.

11. Formation of Plastic Zones near Spherical Cavity in Hardened Low-Carbon Steels under Conditions of Hydrogen Stress Corrosion / N.N. Sergeev, V.A. Tereshin, A.N. Sergeev, D.M. Khonelidze, A.E. Gvozdev, A.N. Chukanov, I.M. Leont'ev, A.G. Kolmakov, A.A. Yakovenko // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. № 4. P. 663-669.

12. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018. Т. 22, № 2(77). С. 52-63. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63>.

13. Влияние технологических режимов упрочнения арматурного проката для композиционных железобетонных конструкций на чувствительность к коррозионно-механическому разрушению / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, О.В. Пантюхин // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. Вып. 3. С. 558-568.

14. Кинетика распространения трещин в металлических материалах при коррозионно-механическом разрушении / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2018. Т. 8, № 1 (26). С. 24-37.

15. Исследование сравнительной стойкости арматурных сталей в процессе ускоренных лабораторных испытаний на водородное растрескивание / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2018. Т. 8, № 1 (26). С. 38-48.

16. Влияние уровня растягивающих напряжений на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 6-19.

17. Влияние температуры отпуска на стойкость арматурной стали 20ГС2 против водородного растрескивания / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев,

Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 54-67.

18. Взаимодействие дисперсных компонентов смазочного композиционного материала, содержащего наночастицы диалкоксидов вольфрама / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 5. Ч. 2. С. 136-144.

19. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

20. Технология конструкционных, эксплуатационных и инструментальных материалов / А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Д. Бреки. Тула, 2018. 406 с.

21. Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния, для узлов трения управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий / под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 166 с.

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

23. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 126-129.

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

25. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

26. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

References

1. Sergeev N. N., Chukanov A. N., Baranov V. P., Yakovenko A. A. Development of Damage and Decarburization of High-Strength Low-Alloy Steels Under Hydrogen Embrittlement. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 57, no. 1, pp. 63-68.

2. Chukanov A. N., Sergeev N.N., Tikhonov I. V., Yakovenko A. A., Leontiev I. M. Vzaimosvyaz' povrezhdaemosti i pereraspredeleniya primesei vnedreniya v konstruktsionnykh stalyakh pri deformatsii i korroziionnom vozdeistvii [The relationship of damage and redistribution of impurities introduction in structural steels under deformation and corrosion]. *Deformatsiya i razrushenie = Deformation and destruction*, 2015, no. 6, pp. 37-42 (In Russ.).

3. Davydov Yu. I., Ageev V. S., Sergeev N. N. Obezuglerozhivanie stali v agressivnoi srede [Decarburization of steel in an aggressive environment]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Mechanical engineering technology*, 1974, vol. 35, pp. 145-152 (In Russ.).

4. Kolachev B. A. *Vodorodnaya khрупkost' metallov* [Hydrogen brittleness of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 217 p. (In Russ.).

5. Chukanov A. N., Levin D. M., Yakovenko A. A. Use and Prospects for the Internal Friction Method in Assessing the Degradation and Destruction of Iron-Carbon Alloys. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2011, vol. 75, no. 10, pp. 1340-1344. ISSN 1062-8738.

6. Chukanov A. N., Sergeev N. N., Tereshin V. A., Rostovtsev R. N., Yakovenko A. A., Leontiev I. M. Termodinamicheskoe obosnovanie «metanovogo» mekhanizma destruktсии uprochnennykh konstruktsionnykh stalei pri elektroliticheskom navodorozhivanii pod napryazheniem [Thermodynamic study "methane" mechanism of destruction of reinforced structural steel in the electrolytic hydrogen absorption under stress]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Deformation and fracture of materials*, 2015, no. 10, pp. 32-39 (In Russ.).

7. Leontiev I. M., Chukanov A. N., Sergeev N. N., Yakovenko A. A. [Decarburization, hydrogen brittleness and aging of high-strength steels under conditions of electrolytic hydrogenation]. *Mater. mezhd. konf. "XXI Peterburgskie Chteniya po problemam prochnosti"* [Mater. intl. Conf. "XXI Petersburg Readings on strength problems"]. Saint-Petersburg, 2014, pp. 194-197 (In Russ.).

8. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Teoriya uprugosti* [Theoretical physics]. Vol. VII. Theory of elasticity. Moscow, Nauka Publ., 1982, 248 p. (In Russ.).

9. Vladimirov V. I. *Teoriya funktsii kompleksnoi peremennoi* [Physical heat of metal destruction]. Moscow, Metallurgy Publ., 1984, 280 p. (In Russ.).

10. Sveshnikov A. G., Tikhonov A. N. *Teoriya funktsii kompleksnoi peremennoi* [Theory of functions of a complex variable]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 336 p. (In Russ.).

11. Sergeev N. N., Tereshin V. A., Sergeev A. N., Khonelidze D. M., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Leontiev I. M., Kolmakov A. G., Yakovenko A. A. Formation of Plastic Zones near Spherical Cavity in Hardened Low-Carbon Steels under Conditions of Hydrogen Stress Corrosion. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 663-669.

12. Sergeyev N. N., Izvolsky V. V., Sergeyev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Clementyev D. S. Vliyanie mikrostrukturnykh faktorov i termicheskoi obrabotki na korroziionnyuyu stoikost' armaturnoi stali klassa A600 [The influence of microstructural factors and heat treatment on the corrosion resistance of reinforcing steel of class A600].

Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 52-63 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63>.

13. Sergeev N. N., Izvol'skiy V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Pantjuhina O. V. Vliyanie tekhnologicheskikh rezhimov uprochneniya armaturnogo prokata dlya kompozitsionnykh zhelezobetonnykh konstruksii na chuvstvitel'nost' k korrozionno-mekhanicheskomu razrusheniyu [The impact of technological modes of hardening of reinforcing bars for composite concrete structures for sensitivity to corrosion-mechanical failure]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*, 2019, vol. 3, pp. 558-568 (In Russ.).

14. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Kinetika rasprostraneniya treshchin v metallicheskih materialakh pri korrozionno-mekhanicheskom razrushenii [Kinetics of crack propagation in metal materials under corrosion-mechanical fracture]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 1 (26), pp. 24-37 (In Russ.).

15. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Clementyev D. S. Issledovanie sravnitel'noi stoikosti armaturnykh stalei v protsesse uskorennykh laboratornykh ispytaniy na vodorodnoe rastreskivanie [Study of the comparative resistance of reinforcing steels in the process of accelerated laboratory tests for hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 1 (26), pp. 38-48 (In Russ.).

16. Sergeev N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Tikhonov I. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Vliyanie urovnya rastyagivayushchikh napryazhenii na dlitel'nuyu prochnost' armaturnykh stalei v vodorodsoderzhashchikh sredakh [Influence of the level of tensile stresses on the long-term strength of reinforcing steels in hydrogen-containing media]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 6-19 (In Russ.).

17. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Vliyanie temperatury otpuska na stoikost' armaturnoi stali 20GS2 protiv vodorodnogo rastreskivaniya [The influence of the tempering temperature of for resistance of reinforcing steel 20GS2 against hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 54-67 (In Russ.).

18. Breki A. D., Tolochko O. V., Vasilyeva E. S., Gvozdev A. E., Starikov N. E. Vzaimodeistvie dispersnykh komponentov smazochnogo kompozitsionnogo materiala, soderzhashchego nanochastitsy dikhal'kogenidov vol'frama [Interaction of dispersed components of lubricant composite material containing nanoparticles of tungsten dichalcogeni-

des]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical science*, 2015, no. 5, pt. 2, pp. 136-144 (In Russ.).

19. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Kolmakov A. G., Tikhonova I. V., Sergeev A. N., Provotorov D., Janelidze D. M., Maly D. V., Golyshev I. V. Raspredelenie temperatur i struktura v zone termicheskogo vliyaniya dlya stal'nykh listov posle lazernoi rezki [The distribution of temperature and structure in the heat affected zone for steel sheets after laser cutting]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2016, no. 9, pp. 3-7 (In Russ.).

20. Gvozdev A. E., Starikov N. E., Sergeev N.N., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Breki A. D. *Tekhnologiya konstruktsionnykh, ekspluatatsionnykh i instrumental'nykh materialov* [Technology of structural, operational and tool materials]. Tula, 2018, 406 p. (In Russ.).

21. Breki A. D., Medvedev V. V., Krylov N.A., Aleksandrov S. E., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Starikov N. E., Provotorov D.A., Sergeev N. N., Mali D. V. *Zhidkie i konsistentnye smazochnye kompozitsionnye materialy, sodержashchie dispersnye chastitsy gidrosilikatov magniya, dlya uzlov treniya upravlyaemykh sistem* [Liquid and grease lubricants composite materials containing dispersed particles of magnesium hydrosilicates, for friction control systems]. Tula, 2016. 166 p. (In Russ.).

22. Shorshorov M. Kh., Gvozdev A. E., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Breki A. D., Sergeev N. N., Kuzovlev O. V., Starikov N. E., Mali D. B. *Razrabotka progressivnykh tekhnologii polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozitsionnykh nanomaterialov* [Development of progressive technologies for the production and processing of metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. Tula, 2016. 235 p. (In Russ.).

23. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

24. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonov I. V., Kolmakov A. G. Rol' protsessa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotorykh fazovykh perekhodov pervogo roda [The role of nucleation in the development of some phase transitions of the first kind]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

25. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Provotorov D. A. Vliyanie deformatsionnoi povrezhdaemosti na formirovanie mekhanicheskikh svoistv malouglerodistykh staley [Influence of deformation damage on the formation of mechanical properties of low-carbon steel]. *Proizvodstvo prokata = Production of rolled products*, 2015, no. 12, pp. 9-13 (In Russ.).

26. Baranov V. P., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Sergeev N. N., Chukanov A. N. Mnogourovnevyy podkhod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnykh konstruktsionnykh staley pod deistviem vodoroda [Multilevel approach to the problem of delayed destruction of high-strength structural steels under the action of hydrogen]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 7, pp. 11-22 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Чуканов Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии и сервиса, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Терешин Валерий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры технологии и сервиса, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Сергеев Александр Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: ansergueev@mail.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Яковенко Александра Александровна, кандидат технических наук, инженер, ООО «Металлург-Туламаш», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: AlexYakovenk@gmail.com

Alexander N. Chukanov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation e-mail: technology@tspu.tula.ru

Valery A. Tereshin, Cand. of Sci. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Associate Professor of the Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation e-mail: technology@tspu.tula.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Sergey N. Kutepov, Cand. of Sci. (Pedagogical), Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Aleksandr N. Sergeev, Dr. of Sci. (Pedagogical), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation e-mail: ansergueev@mail.ru

Evgeniy V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Alexandra A. Yakovenko, Cand. of Sci. (Engineering), Engineer, LLC «Metallurg-Tulamash», Tula, Russian Federation, e-mail: AlexYakovenk@gmail.com