

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА ВНУТРИ КОЛЬЦА ПОДШИПНИКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАТЯГА И ВРАЩЕНИЯ ВАЛА



¹Татьяна Владимировна Зиновьева, к.т.н., с.н.с.,
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)321-4770, E-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com



²Алия Радиковна Галяутдинова, аспирант,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: aliyagalyautdinova@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрен актуальный вопрос о распределении в подшипнике качения свободного водорода, выделенного в результате распада смазки при трении.

Определено напряженно-деформированное состояние внутреннего кольца подшипника, посаженного с натягом на вращающийся вал. Построены зависимости механических напряжений от радиальной координаты при различных величинах натяга и угловой скорости вращения.

На основании расчетов и экспериментальных данных получена зависимость коэффициента диффузии водорода в напряженном кольце. Показано, что под воздействием напряжений концентрация свободного водорода в кольце подшипника увеличивается.

Ключевые слова: подшипник качения, напряжения от натяга, коэффициент диффузии, концентрация водорода.

Введение

Подшипники качения широко используются в автомобилестроении, электродвигателях и промышленном оборудовании. При разрушении подшипника в процессе его эксплуатации может выйти из строя вся рабочая конструкция. Практика показывает, что много случаев преждевременного разрушения подшипников качения произошло из-за негативного воздействия водорода. В разрушенных подшипниках были обнаружены обширные приповерхностные дефекты, называемые белыми трещинами травления [1, 2].

Конструкция подшипников качения состоит из двух колец, тел качения (шариков или роликов) и сепаратора, удерживающего тела качения на равном расстоянии друг от друга [3] (рис. 1).



Рис. 1. Устройство подшипника качения: 1 – внутреннее кольцо, 2 – внешнее кольцо, 3 – сепаратор, 4 – тело качения

Установлено, что некоторые типы смазок, используемых в подшипниках для уменьшения трения между телами качения и кольцами, имеют свойство распадаться в результате трибохимической реакции [4]. Выделяемые при этом свободные атомы водорода диффундируют в подшипниковую сталь и оказывают сильное негативное влияние на её прочность [5].

Диффузионно-подвижный (свободный) водород перераспределяется в объеме материала под действием механических напряжений, занимая энергетически выгодные состояния и ослабляя механические свойства материала [6]. В результате в подшипнике возникают зоны повышенных концентраций водорода и напряжений, которые под воздействием циклических нагрузок могут привести к его усталостному разрушению.

В связи с этим, важной является задача теоретического определения распределения диффузионно-подвижного водорода в материале подшипника во время его эксплуатации, её решение поможет оценить

влияние водорода на механические свойства материала и выявить наиболее опасные места в подшипнике, в которых можно ожидать появление микротрещин.

Опыт показывает, что чаще всего поломке от усталостного разрушения подвержено внутреннее кольцо подшипника. В данной работе исследуется распределение свободного водорода во внутреннем кольце подшипника, посаженного с натягом на вращающийся вал (рис. 2 а).

Поскольку только статические растягивающие напряжения влияют на процесс разрушения металла в результате его наводороживания, а циклические напряжения создают лишь усталостное состояние металла [7], то при расчете будем пренебрегать периодическим воздействием силы тяжести и обкатывающих роликов на вращающееся кольцо подшипника.

1. Напряженно-деформированное состояние системы вал – кольцо при посадке с натягом

Подшипники качения устанавливаются на вал с натягом, определяемым разностью посадочных размеров. Подшипник имеет посадочное отверстие меньшего диаметра, чем диаметр вала. Часто для дополнительной осевой фиксации подшипника используют затяжку при помощи стопорных гаек или торцевых шайб.

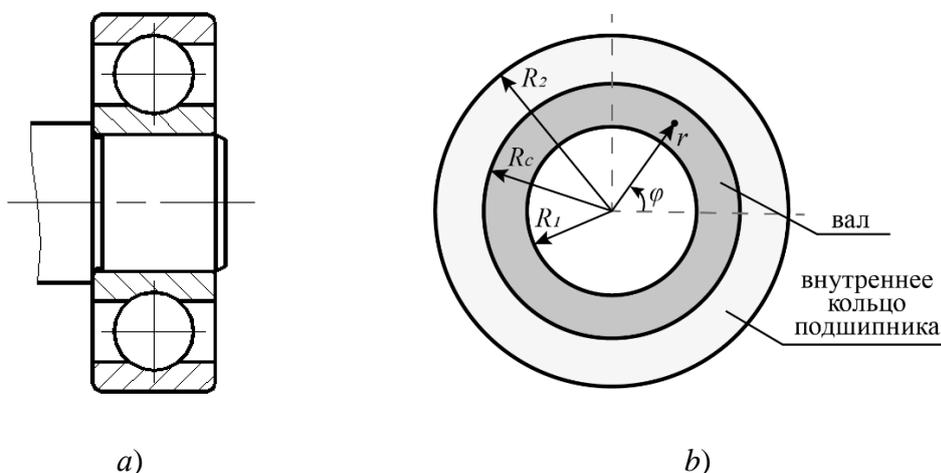


Рис. 2. Подшипник на валу а) и расчетная схема вал – внутреннее кольцо б)

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние полого вала и кругового кольца, посаженного на него с натягом. Кольцо вращается вместе с валом с постоянной угловой скоростью. Для упрощения принято, что кольцо и вал имеют одинаковую длину, и их концы зафиксированы, поэтому задача рассматривается в постановке плоской деформации. Это допущение часто принимается в работах по расчету дисков и муфт, посаженных с натягом на вал [8 – 10].

Приведем аналитическое решение задачи для вала и кольца из упругих однородных материалов. Введём полярную систему координат (r, φ) , вращающуюся вместе с валом, начало координат выберем на его оси вращения. Обозначим внутренний радиус вала R_1 , внешний радиус кольца R_2 , радиус посадки R_c (рис. 2 б).

Нагрузкой является контактное давление от натяга кольца на вал и центробежная сила. Учитывая осесимметрию задачи, для вала и кольца в отдельности уравнение баланса сил имеет вид:

$$\sigma'_r = \frac{1}{r}(\sigma_\varphi - \sigma_r) - \rho\omega^2 r, \quad (1)$$

здесь σ_r, σ_φ – радиальное и окружное напряжение соответственно, $(...)' = d/dr$, ω – угловая скорость вращения вала, ρ – объёмная плотность материала. В задаче перемещения и деформации двумерны, но тензор напряжений содержит ещё третью компоненту в перпендикулярном направлении: $\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\varphi)$.

Уравнение (1) дополняется уравнением совместности деформаций и соотношениями упругости:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_\varphi &= \frac{1}{r}(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi), \quad \varepsilon_r = u' = \frac{1}{E}[\sigma_r - \nu(\sigma_\varphi + \sigma_z)], \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{u}{r} = \frac{1}{E}[\sigma_\varphi - \nu(\sigma_r + \sigma_z)], \end{aligned} \quad (2)$$

где u – радиальное смещение. Разыскивая решение задачи в виде:

$$\sigma_r = \frac{F(r)}{r}, \quad \sigma_\varphi = F'(r) + \rho\omega^2 r^2, \quad (3)$$

мы удовлетворим уравнение (1) тождественно [11], а из (2) выразим уравнение для нахождения функции $F(r)$:

$$r^2 F'' + rF' - F = \left(\frac{2\nu - 3}{1 - \nu} \right) \rho\omega^2 r^3,$$

откуда получим

$$F(r) = Ar + \frac{B}{r} - \lambda\rho\omega^2 r^3, \quad \lambda \triangleq \frac{3 - 2\nu}{8(1 - \nu)}, \quad (4)$$

$$\sigma_r = A + \frac{B}{r^2} - \lambda\rho\omega^2 r^2, \quad \sigma_\varphi = A - \frac{B}{r^2} + (1 - 3\lambda)\rho\omega^2 r^2.$$

Константы A, B подлежат определению с помощью граничных условий. Запишем решение (4) для вала с константами A_1, B_1 , а для кольца – с A_2, B_2 и определим все константы из условий: на внутреннем радиусе (R_1) и на внешнем радиусе (R_2) напряжение $\sigma_r = 0$, на радиусе контакта вала

и кольца подшипника (R_c) непрерывно радиальное напряжение σ_r , и должно выполняться условие натяга:

$$u^{(2)} = u^{(1)} + \delta, \quad (5)$$

здесь $u^{(1)}$ и $u^{(2)}$ – смещение точек вала и кольца соответственно, δ – заданный радиальный натяг. Используя граничные условия, получим линейную алгебраическую систему для четырех констант $A_1 - B_2$. Решив ее, найдем напряжения по формулам (4) и радиальное смещение по формуле (2).

Определим напряженно-деформированное состояние системы вал-кольцо от величины натяга и угловой скорости вращения. Для расчета используем параметры роликовых многорядных подшипников качения, устанавливаемых на современных прокатных станах. Такие подшипники могут иметь диаметр более метра, поэтому влияние угловой скорости вращения на них существенно. Рабочая частота вращения валков стана обычно лежит в диапазоне 90 – 300 об/мин.

На рис. 3а представлены результаты расчета напряжений в паре вал – кольцо подшипника с такими параметрами: внутренний радиус вала $R_1 = 300$ мм, внешний радиус кольца $R_2 = 438$ мм, радиус посадки $R_c = 400$ мм, радиальный натяг $\delta = 0.6$ мм, скорость вращения вала $\omega = 250$ об/мин, модуль Юнга и коэффициент Пуассона стали: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.28$.

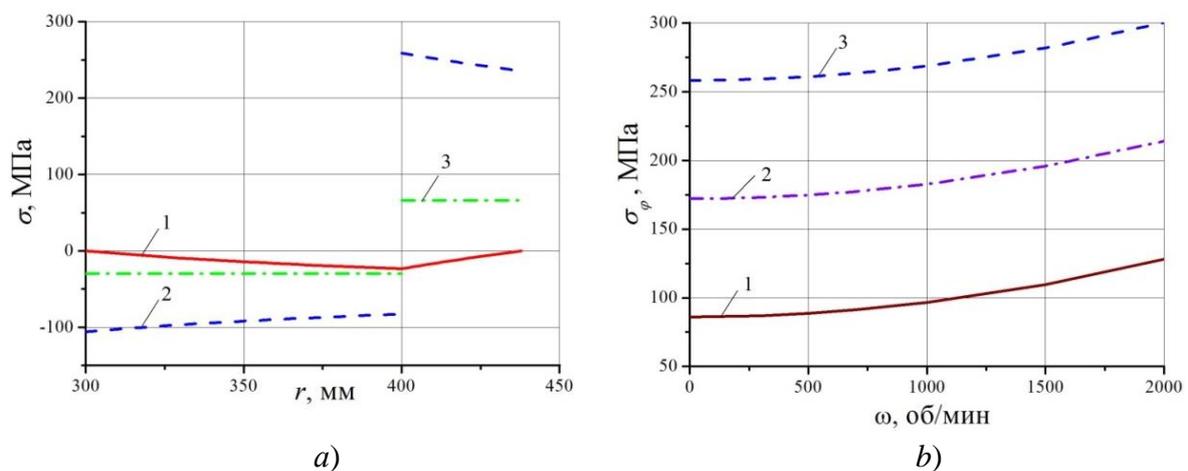


Рис. 3. Напряжения в вале и кольце как функция радиальной координаты *a)*: радиальные (1), окружные (2), осевые (3); окружное напряжение в кольце при $r = R_c$ как функция угловой скорости *b)* при различных натягах δ : 0.2 мм (1), 0.4 мм (2), 0.6 мм (3)

Видно, что в процессе посадки вал сжимается, а внутреннее кольцо подшипника сжато в радиальном направлении и растянуто в окружном и

осевом. Литературные данные указывают на то, что именно растягивающие напряжения вызывают перераспределение водорода в металле [12], поэтому в кольце подшипника стоит ожидать образования локальных зон, обогащённых водородом с последующей деградацией материала [13 – 16].

Влияние угловой скорости вращения вала на окружное напряжение в самой нагруженной точке кольца подшипника (при $r = R_c$) показано на рисунке 3 б для трёх значений натяга. С ростом скорости вращения от 0 до 500 об/мин значение окружного напряжения увеличивается на 1 – 3%.

2. Диффузия водорода в поле напряжений

При моделировании влияния водорода на механические свойства металлов и сплавов используются различные подходы [17], единой универсальной модели пока не существует. В работе [18] отмечено, что при описании транспорта водорода законы диффузии хорошо работают при достаточно малых концентрациях водорода в металле, встречающихся при эксплуатации реальных конструкций.

Согласно законам Фика при отсутствии объемных источников уравнение диффузии имеет вид:

$$\nabla \cdot (D \nabla C) = \dot{C}, \quad (6)$$

где $C(\mathbf{r})$ – поле концентрации свободного водорода в металле, $D(\mathbf{r})$ – коэффициент диффузии.

Влияние напряженно-деформированного состояния твердого тела учитывается через коэффициент диффузии по-разному. Так в работе [19] предложено использовать не скаляр, а тензор коэффициентов диффузии, выраженный через тензор напряжений в теле, но автором не внесена ясность в определении значений компонентов этого тензора. Авторы работ [20, 21] предлагают такую зависимость для полимерных материалов при умеренных одноосных напряжениях σ :

$$D = D_0 \left(1 + \alpha \frac{\sigma}{\mu} \right), \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (7)$$

здесь D_0 – коэффициент диффузии в ненапряженном теле, α – положительная константа, μ – модуль сдвига. Добавка, обусловленная механическими напряжениями, пропорциональна деформации материала. При небольшом растяжении коэффициент диффузии увеличивается, а при сжатии уменьшается.

Для проведения расчетов связанных задач предпочтительно использование прямых экспериментальных данных по зависимости величины коэффициента диффузии от напряжений [22]. В работах [23, 24] оценивалось влияние постоянной растягивающей нагрузки на

коэффициент диффузии водорода в двухфазной стали с помощью установки электрохимического проникновения. Упругие растягивающие напряжения повысили коэффициент диффузии водорода, это объясняется авторами увеличением размера элементарной ячейки, что облегчает диффузию водорода. Когда же приложенное напряжение было равно пределу текучести, увеличивающееся количество водородных ловушек компенсировало увеличение коэффициента диффузии. Таким образом, значительная пластическая деформация, замедляла диффузию из-за образования дефектов решетки. Похожие выводы сделаны и для низкоуглеродистой стали в работах [25, 26].

На основании приведенных в упомянутых работах экспериментальных данных была построена зависимость безразмерного коэффициента D/D_0 от отношения напряжения σ в металле к пределу текучести. Эта зависимость была экстраполирована на отрицательную область напряжений по аналогии с формулой (7), её график приведен на рисунке 4.

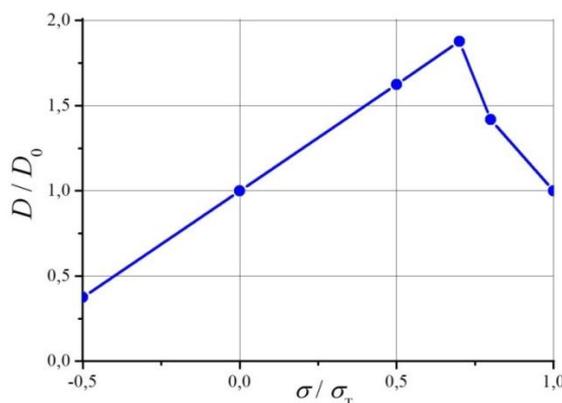


Рис. 4. Экспериментальная зависимость коэффициента диффузии от напряжения

Отметим, что во всех указанных работах при проведении эксперимента изучался поток водорода перпендикулярный направлению приложения одноосной нагрузки σ , поэтому в рассматриваемой осесимметричной задаче коэффициент диффузии в радиальном направлении будет функцией окружных напряжений.

Из графиков п. 1 видно, что окружные напряжения терпят разрыв на радиусе контакта вала и кольца подшипника, это приводит к скачкообразному изменению коэффициента диффузии (рис. 5 а).

3. Расчёт концентрации водорода

Рассчитаем распределение свободного водорода в системе вал – кольцо подшипника. Производная по времени во вращающейся системе имеет вид:

$$\dot{C} = \frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \omega \frac{\partial C}{\partial \varphi}.$$

Учитывая осесимметрию задачи и полагая процесс диффузии установившимся, будем считать далее $\dot{C} = 0$.

Пусть на внешнем радиусе задана концентрация водорода от смазки C_0 , а на внутреннем радиусе она равна нулю. Учитывая (6), имеем следующую задачу:

$$r(DC')' + DC' = 0, \quad C|_{r=R_1} = 0, \quad C|_{r=R_2} = C_0. \quad (8)$$

Поскольку коэффициент D терпит разрыв, решение задачи (8) следует рассматривать на двух участках, сшивая решения на радиусе контакта условиями непрерывности функции концентрации и диффузионного потока:

$$C_1|_{R_c-0} = C_2|_{R_c+0}, \quad DC_1'|_{R_c-0} = DC_2'|_{R_c+0}.$$

Решение имеет вид:

$$C(r) = \frac{C_0}{\psi(R_2)} \psi(r), \quad \psi(r) = \int_{R_1}^r \frac{d\xi}{\xi D(\xi)}. \quad (9)$$

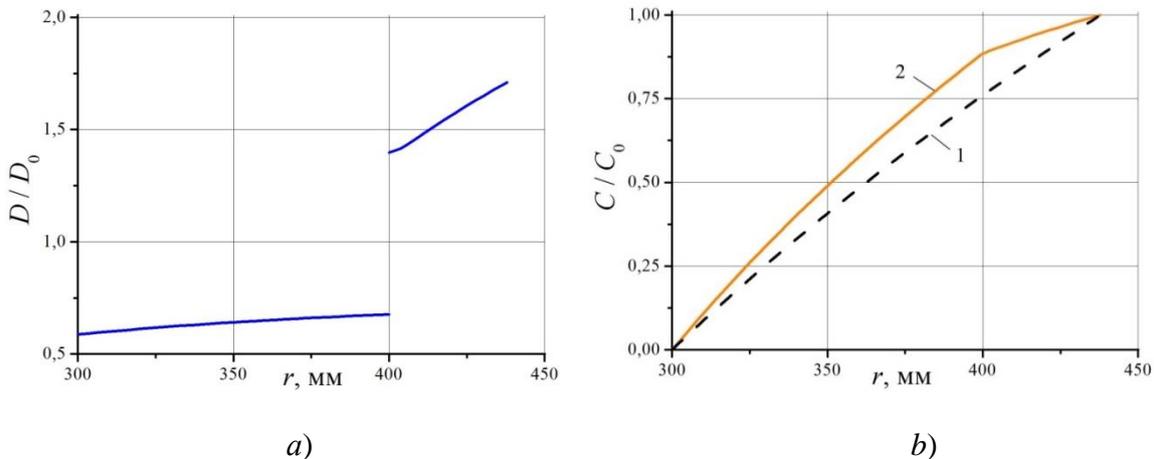


Рис. 5. Коэффициент диффузии *a)* и концентрация свободного водорода *b)* в вале и кольце: ненапряженное тело (1), с учетом напряжений (2)

Для стального вала и кольца из п. 1 построен график безразмерной функции концентрации свободного водорода C/C_0 от радиальной координаты (рис. 5 б). Для сравнения там же построен график для ненапряженного стального кольца с теми же граничными условиями. Видно, что напряжения от натяга и угловой скорости вращения вала увеличивают концентрацию водорода в кольце подшипника, максимальный прирост в 10 % происходит на радиусе посадки подшипника на вал.

Заключение

Проведенные в работе расчёты показали, что во внутреннем кольце подшипника при его посадке на вращающийся вал возникают большие растягивающие окружные напряжения, вместе с повышенной концентрацией свободного водорода они создают условия для водородной деградации стали внутри подшипника.

Полученные поля напряжений и концентрации водорода послужат первым шагом в рекуррентном процессе решения связанной задачи теории упругости и диффузии по оценке влияния водорода на прочность подшипника качения.

В дальнейшем для уточнения расчётов планируется оценить добавочную циклическую нагрузку на кольцо подшипника со стороны силы тяжести и обкатывающих роликов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Vegter, R.H., Slycke, J.T. The Role of Hydrogen on Rolling Contact Fatigue Response of Rolling Element Bearings. 2010. Journal of Astm International. 7, pp. 1–12.
- [2] Evans, M.H. An updated review: white etching cracks (WECs) and axial cracks in wind turbine gearbox bearings. 2016. Materials Science and Technology. pp. 1–37.
- [3] Сидоров В.А., Сотников А.Л. Эксплуатация подшипников качения. М.: Инфра-Инженерия. 2022. 136 с.
- [4] Tamada, K., Tanaka, H. Occurrence of Brittle Flaking on Bearings Used for Automotive Electrical Instruments and Auxiliary Devices. 1996. Wear. 199, pp. 245–252.
- [5] Жаров В.Г., Максимов А.В., Сумзина Л.В. Анализ причин разрушения контактирующих поверхностей деталей подшипниковых опор машин и технологического оборудования зданий и сооружений. 2020. Вестник Евразийской науки. 12(1), с. 1–8.
- [6] Беляев А.К., Кудинова Н.Р., Полянский В.А., Яковлев Ю.А. Описание деформации и разрушения материалов, содержащих водород, с помощью реологической модели. 2015. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 3(225), с. 134–149.
- [7] Овчинников И.И. Исследование поведения оболочечных конструкций, эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание [Электронный документ]. 2012. Интернет-журнал «Науковедение». 4. (<http://naukovedenie.ru/PDF/38tvn412.pdf>). Проверено 15.04.2023.

- [8] Пономарев С.Д. Расчеты на прочность в машиностроении. М: Машгиз. 1958. 1120 с.
- [9] Мирсалимов В.М. Обратная задача механики разрушения для диска, посаженного на вращающийся вал. 2009. Прикладная механика и техническая физика. 50(4), с. 201–209.
- [10] Буренин А.А., Ткачева А.В., Фирсов С.В. Задача Гадолина о сборке двухслойного вала горячей посадкой с испытанием соединения на отрыв. 2002. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 26(3), с. 480–499.
- [11] Работнов Ю.Н. Соппротивление материалов. М.: Ленанд. 2019. 456 с.
- [12] Суранов Г. И. Водород: разрушение, изнашивание, смазка деталей машин. Ухта: УГТУ. 2015. 224 с.
- [13] Зиновьева Т.В. Влияние концентрации водорода на растрескивание трубы. 2020. Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 9-й Международной научно-практической конференции. с. 196–206.
- [14] Чулкин С.Г., Зиновьева Т.В. Расчет влияния водорода на прочность морского трубопровода. 2019. Морские интеллектуальные технологии. 2(44), с. 31–35.
- [15] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Analysis of axisymmetric vibrations of a hydrogen weakened pipe in a layered shell model. 2022. Advances in Mechanical Engineering, LNME. pp. 78–85.
- [16] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Harmonic Vibrations of a Hydrogen-Damaged Pipeline as an Inhomogeneous Shell. 2023. Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 187–194.
- [17] Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Metallurgy. 1985. 216 с.
- [18] Яковлев Ю.А., Полянский В.А., Седова Ю.С., Беляев А.К. Модели влияния водорода на механические свойства металлов и сплавов. 2020. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 3. с. 136–160.
- [19] Рюмшина Т.А. Особенности диффузии водорода в напряженных средах. 1999. Физика и техника высоких давлений. 9(2), с. 87–91.
- [20] Fahmy, A.A., Hurt J.C. Stress dependence of water diffusion in epoxy resin. 1980. Journal of Polymer Composites. 1(2), pp. 77–80.
- [21] Shanati, S., Ellis, N.S., Randall, T.J., Marshall, J.M. Coupled diffusion and stress by the finite element method. 1995. Applied Mathematical Modelling. 19(2), pp. 87–94.

- [22] Ребяков Ю.Н., Чернявский А.О., Чернявский О.Ф. Деформирование и разрушение материалов и конструкций в условиях диффузии. 2010. Вестник ЮУрГУ. 10. с. 4–16.
- [23] Eeckhout, E., Baere, I., Depover, T., Verbeken, K. The effect of a constant tensile load on the hydrogen diffusivity in dual phase steel by electrochemical permeation experiments. 2020. Materials Science and Engineering: A. 773.
- [24] Reddy, K.S., Govindaraj, Y., Neelakantan, L. Hydrogen diffusion kinetics in dual-phase (DP 980) steel: The role of pre-strain and tensile stress. 2023. Electrochimica Acta. 439.
- [25] Zhao, W., Zhang, T., He, Z., Sun, J., Wang, Y. Determination of the Critical Plastic Strain-Induced Stress of X80 Steel through an Electrochemical Hydrogen Permeation Method. 2016. Electrochimica Acta. 214, pp. 336–344.
- [26] Kim, S.J., Yun, D.W., Jung, H.G., Kim, K.Y. Determination of hydrogen diffusion parameters of ferritic steel from electrochemical permeation measurement under tensile loads. 2014. Journal of The Electrochemical Society. 161, pp. 173–181.

T.V. Zinovieva¹, A.R. Galyautdinova²

HYDROGEN DISTRIBUTION INSIDE THE BEARING RING UNDER THE INFLUENCE OF INTERFERENCE AND SHAFT ROTATION

¹Institute of Mechanical Engineering, St.-Petersburg, Russia;

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

The paper considers the topical issue of the distribution of free hydrogen in a rolling bearing released as a result of the destruction of the lubricant during friction. The stress-strain state of the inner ring of a bearing fitted with an interference fit on a rotating shaft is determined. The dependences of mechanical stresses on the radial coordinate are constructed for various values of preload and angular velocity of rotation. Based on calculations and experimental data, the dependence of the diffusion coefficient of hydrogen in a strained ring is obtained. It is shown that under the influence of stresses the concentration of free hydrogen in the bearing ring increases.

Key words: rolling bearing, interference stresses, diffusion coefficient, hydrogen concentration.

REFERENCES

- [1] Vegter, R.H., Slycke, J.T. The Role of Hydrogen on Rolling Contact Fatigue Response of Rolling Element Bearings. 2010. *Journal of Astm International*. 7, pp. 1–12.
- [2] Evans, M.H. An updated review: white etching cracks (WECs) and axial cracks in wind turbine gearbox bearings. 2016. *Materials Science and Technology*. pp. 1–37.
- [3] Sidorov, V.A. Sotnikov, A.L. Operation of rolling bearings. 2022. Moscow: Infra-Engineering. p. 136.
- [4] Tamada, K., Tanaka, H. Occurrence of Brittle Flaking on Bearings Used for Automotive Electrical Instruments and Auxiliary Devices. 1996. *Wear*. 199, pp. 245–252.
- [5] Zharov, V.G., Maksimov, A.V., Sumzina, L.V. Analysis of the destruction causes of the contact surfaces of bearing support parts in machines and technological equipment of buildings and structures. 2020. *Bulletin of Eurasian Science*. 12 (1). pp. 1–8.
- [6] Belyaev, A.K., Kudinova, N.R., Polyansky, V.A., Yakovlev, Yu.A. Description of deformation and destruction of materials containing hydrogen using a rheological model. 2015. *Scientific and technical bulletin of St. Petersburg State Polytechnical University. Physical and mathematical sciences*. 3(225), pp. 134–149.
- [7] Ovchinnikov, I.I. Study of the behavior of shell structures operating in media causing corrosion cracking [Electronic document]. 2012. Internet journal ‘Science’. 4. (<http://naukovedenie.ru/PDF/38tvn412.pdf>). Retrieved 04/15/2023.
- [8] Ponomarev, S.D. Strength calculations in mechanical engineering. M: Mashgiz. 1958. p. 1120.
- [9] Mirsalimov, V.M. Inverse problem of fracture mechanics for a disk mounted on a rotating shaft. 2009. *Applied mechanics and technical physics*. 50(4), pp. 201–209.
- [10] Burenin, A.A., Tkacheva, A.V., Firsov, S.V. Gadolin's problem on the assembly of a two-layer shaft by a shrink fit with a pull test of the joint. 2002. *Bulletin of the Samara State Technical University. Series ‘Physical and Mathematical Sciences’*. 26(3), pp. 480–499.
- [11] Rabotnov, Yu.N. Strength of materials. M.: Lenand. 2019. p. 456.
- [12] Suranov, G. I. Hydrogen: destruction, wear, lubrication of machine parts. Ukhta: USTU. 2015. p. 224.
- [13] Zinovieva, T.V. Influence of hydrogen concentration on pipe cracking. 2020. *Modern Engineering: Science and Education: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference*. pp. 196–206.

- [14] Chulkin, S.G., Zinovieva, T.V. Calculation of the effect of hydrogen on the strength of an offshore pipeline. 2019. *Marine Intelligent Technologies*. 2(44), pp. 31–35.
- [15] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Analysis of axisymmetric vibrations of a hydrogen weakened pipe in a layered shell model. 2022. *Advances in Mechanical Engineering, LNME*. pp. 78–85.
- [16] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Harmonic Vibrations of a Hydrogen-Damaged Pipeline as an Inhomogeneous Shell. 2023. *Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 187–194.
- [17] Kolachev, B.A. Hydrogen brittleness of metals. Moscow: Metallurgy. 1985. p. 216.
- [18] Yakovlev, Yu.A., Polyansky, V.A., Sedova, Yu.S., Belyaev, A.K. Models of the effect of hydrogen on the mechanical properties of metals and alloys. 2020. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 3. pp. 136–160.
- [19] Ryumshina, T.A. Peculiarities of hydrogen diffusion in stressed media. 1999. *Physics and technology of high pressures*. 9(2), pp. 87–91.
- [20] Fahmy, A.A., Hurt J.C. Stress dependence of water diffusion in epoxy resin. 1980. *Journal of Polymer Composites*. 1(2), pp. 77–80.
- [21] Shanati, S., Ellis, N.S., Randall, T.J., Marshall, J.M. Coupled diffusion and stress by the finite element method. 1995. *Applied Mathematical Modelling*. 19(2), pp. 87–94.
- [22] Rebyakov, Yu.N., Chernyavsky, A.O., Chernyavsky, O.F. Deformation and destruction of materials and structures under diffusion conditions. 2010. *Bulletin of SUSU*. 10. pp. 4–16.
- [23] Eeckhout, E., Baere, I., Depover, T., Verbeken, K. The effect of a constant tensile load on the hydrogen diffusivity in dual phase steel by electrochemical permeation experiments. 2020. *Materials Science and Engineering: A*. 773.
- [24] Reddy, K.S., Govindaraj, Y., Neelakantan, L. Hydrogen diffusion kinetics in dual-phase (DP 980) steel: The role of pre-strain and tensile stress. 2023. *Electrochimica Acta*. 439.
- [25] Zhao, W., Zhang, T., He, Z., Sun, J., Wang, Y. Determination of the Critical Plastic Strain-Induced Stress of X80 Steel through an Electrochemical Hydrogen Permeation Method. 2016. *Electrochimica Acta*. 214, pp. 336–344.
- [26] Kim, S.J., Yun, D.W., Jung, H.G., Kim, K.Y. Determination of hydrogen diffusion parameters of ferritic steel from electrochemical permeation measurement under tensile loads. 2014. *Journal of The Electrochemical Society*. 161, pp. 173–181.