

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО МОДУЛЯ ЮНГА СРЕДЫ С МИКРОСТРУКТУРОЙ, ХАРАКТЕРНОЙ ДЛЯ ВОДОРОДНОЙ ДЕГРАДАЦИИ

К.П. Фролова

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Работа посвящена определению эффективных упругих свойств металлов с микроструктурой, характерной для водородной деградации. С целью определения эффективных модулей Юнга решается задача гомогенизации по схеме Максвелла в терминах тензоров вклада. Микротрещины, возникающие по границам зерен, моделируются сплюснутыми сфероидами, поры – сферами. Рассматривается три варианта ориентации осей симметрии сфероидов в материале: произвольная, преимущественная ориентация с параметром рассеяния, произвольная ориентация в одной плоскости. Исследуются зависимости эффективных модулей Юнга от пористости материала и от соотношения длин полуосей сфероидов.

Ключевые слова: эффективный модуль Юнга, схема гомогенизации Максвелла, водородная деградация, сфероидальная неоднородность

Ссылка при цитировании: Фролова К.П. Определение эффективного модуля Юнга среды с микроструктурой, характерной для водородной деградации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 2. С. 160–174. DOI: 10.18721/JPM.13213

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE YOUNG'S MODULUS OF MEDIUM WITH MICROSTRUCTURE TYPICAL FOR HYDROGEN DEGRADATION

K.P. Frolova

Institute for Problems of Mechanical Engineering RAS, St. Petersburg, Russian Federation;
Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

The paper aims at calculation of the effective elastic properties of metals with a microstructure typical for hydrogen-enhanced degradation. For the purpose of this study, we use the Maxwell homogenization scheme and explicit expression for compliance contribution tensor to determine the overall Young's moduli. The model introduces oblate spheroids to describe intergranular microcracks and spheres to describe pores. Within the frame of the paper, we consider random orientations of the microcracks, certain preferential orientation accompanied by random scatter with the scattering parameter and random orientations of the spheroids' axes in the same plane. The dependences of the effective Young's moduli on the porosity and aspect ratio of the spheroid have been studied.

Keywords: effective Young's modulus, Maxwell homogenization scheme, hydrogen degradation, spheroidal inhomogeneity

Citation: Frolova K.P., Determination of the effective Young's modulus of medium with microstructure typical for hydrogen degradation, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (2) (2020) 160–174. DOI: 10.18721/JPM.13213

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



Введение

Растворенный в металлах водород может приводить к деградации механических свойств и преждевременному разрушению металлических изделий. Влияние водорода на свойства и характер разрушения материала во многом зависит как от внешних факторов, так и от особенностей внутренней структуры и характеристик материала, а потому явление водородной деградации, под которым понимается вся совокупность отрицательного влияния водорода, остается актуальной проблемой материаловедения и требует тщательного и разностороннего изучения [1, 2].

Множество работ посвящено исследованию влияния водорода на изменение микроструктуры материала [3 – 9]. Считается, что водород диффундирует сквозь кристаллическую решетку металла и взаимодействует с дефектами структуры, такими как дислокации, поры, вакансии и т. п., в результате чего инициируется развитие микротрещин. Дефекты образуются в процессе изготовления деталей и, как правило, располагаются по границам зерен или по границам включений в сплавах (дефекты внутри зерен также имеют место, но в меньшем количестве). В конечном итоге, при отсутствии больших внутренних и внешних напряжений, под действием водорода образуются микротрещины, развивающиеся по границам зерен [3 – 5, 9], или блистеры, приводящие к вспучиванию поверхности [7, 9]. При этом микротрещины могут наблюдаться также в местах тройного стыка зерен [4, 5, 8, 9]. Зачастую можно видеть, что микротрещины имеют преимущественное направление развития – параллельно направлению прокатки [3, 7].

В ряде работ [10 – 12] исследовалась диффузия водорода по границам зерен. Определялся эффективный коэффициент диффузии в композитном материале, одна фаза которого представляла собой границы зерен с высоким коэффициентом диффузии, а другая – сами зерна с низким коэффициентом диффузии. При этом изменение микроструктуры под действием водорода не моделиро-

валось. Связная задача переноса водорода и изменения дефектности материала решалась, например, в работе [13], с использованием феноменологических подходов. Влияние водорода на материал учитывалось в рамках теории накопления повреждений. Ряд работ посвящен исследованию деградации упругих свойств материала под влиянием водорода [9, 14, 15]. Водородная деградация низкоуглеродистых сталей изучалась в работе [9] на различных масштабных уровнях. Было обнаружено, что длительное насыщение водородом приводит к снижению объемного модуля упругости. Анализ микроструктуры показал, что причиной подобного изменения может быть деформация зерен, образование микротрещин и блистеров. В работе [14] показано, что длительное наводороживание может приводить к снижению до 15% модуля Юнга сплава на основе гамма-алюминиды титана. В работе [15] проводились эксперименты с тремя различными типами высокопрочных сталей. Насыщение сталей водородом во всех случаях приводило к деградации механических свойств и изменению микроструктуры.

Обобщая вышеизложенные сведения, отметим, что аналитические модели водородной деградации, как правило, направлены на учет диффузии водорода, являющейся, как считается, основным процессом, приводящим к изменению микроструктуры и деградации механических свойств. При этом меньший акцент делается на описании деградации упругих свойств в результате самого изменения микроструктуры.

Цель данной работы – определить эффективные упругие модули материала, микроструктура которого предполагается уже сформированной в результате водородной деградации.

В связи с этим решается задача гомогенизации, позволяющая оценить вклад неоднородностей в конкретное свойство. Исследуется влияние на эффективные модули Юнга материала как возможной формы и ориентации в нем микротрещин, так и его пористости.

Микроструктура материала

В данной работе исследуется влияние микротрещин, близких по форме к монетообразным, а также пор на эффективные свойства материала, в предположении, что первые учитывают растрескивание между двумя соседними зёрнами, а вторые – влияние тех пор, которые не слились в микротрещины, и пустот в местах тройного стыка зёрен. В статье [16] отмечается, что умеренная неровность границы плоской трещины или отклонение от округлой формы не оказывает существенного влияния на упругие свойства материала, а потому подобная неоднородность может моделироваться как эллиптическая. В рамках настоящей работы микротрещины моделировались сплюснутыми сфероидами, а поры – сферами. При этом были рассмотрены три варианта ориентации неоднородностей в материале.

В первом случае считалось, что микротрещины имеют случайное (изотропное) распределение в объеме. Такая картина характерна для металлических изделий, слабо деформированных в процессе производства.

Во втором случае предполагалось, что микротрещины имеют преимущественную ориентацию (например, при прокатке и слюистой структуре материала). Принималось во внимание, что при этом микротрещины могут отклоняться от преимущественного направления.

В третьем случае для полноты картины был рассмотрен вариант, когда оси симметрии сфероидальных микротрещин имеют произвольную ориентацию в некоторой плоскости. Подобная ситуация наблюдается, например, при сжатии материала и отсутствии развития трещин в плоскости нагружения.

Тензор вклада сфероидальной микротрещины в податливость

Для описания вклада отдельной неоднородности в конкретное свойство, в рамках метода гомогенизации используются тензоры вклада [17].

Рассмотрим однородный упругий материал (матрицу) с тензором податливости \mathbf{S}^0 . Выделим из него представительный объем V , содержащий изолированную неоднородность объемом V_1 с тензором податливости \mathbf{S}^1 . Объем V , с одной стороны, должен быть достаточно большим, чтобы отображать характерную микроструктуру, а с другой – достаточно малым по сравнению с объемом материала, чтобы можно было пренебречь изменениями полей на макроуровне. Вопрос корректного выбора представительного объема в микромеханике обсуждается, например, в монографии [17]. Для оценки эффективных упругих свойств материала необходимо определить тензор вклада неоднородности в податливость – тензор четвертого ранга \mathbf{H} , описывающий дополнительную деформацию $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}$, возникающую в объеме V ввиду присутствия неоднородности:

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{V_1}{V} \mathbf{H} : \boldsymbol{\sigma}_0, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\sigma}_0$ – определяемое граничными условиями поле напряжений, которое было бы в представительном объеме в отсутствие неоднородности.

Тензор вклада эллипсоидальной неоднородности в податливость может быть выражен через тензоры податливости матрицы и неоднородности, характеризующие свойства материала, и через второй тензор Хилла \mathbf{Q} , отражающий влияние формы неоднородности:

$$\mathbf{H} = \left[(\mathbf{S}^1 - \mathbf{S}^0)^{-1} + \mathbf{Q} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Тензор четвертого ранга \mathbf{Q} связан с первым тензором Хилла \mathbf{P} соотношением

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}^0 - \mathbf{C}^0 : \mathbf{P} : \mathbf{C}^0,$$

где \mathbf{C}^0 – тензор жесткости матрицы.

В свою очередь, тензор четвертого ранга \mathbf{P} выражается через производные функции Грина для перемещений \mathbf{G} как

$$\mathbf{P} = \left(\nabla \int_{V_1} \mathbf{G}(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \nabla dV' \right)_{(1,2)(3,4)}^S, \quad (3)$$

где $(\)_{(1,2)(3,4)}^s$ означает симметрию по перестановке индексов в первой и второй паре.

Поры и микротрещины характеризуются нулевыми упругими модулями. Тогда $\mathbf{S}^1 \rightarrow \infty$, а выражение (2) сводится к $\mathbf{H} = \mathbf{Q}^{-1}$. Для сфероидальной микротрещины, находящейся в изотропной матрице, тензоры \mathbf{H} и \mathbf{Q} являются трансверсально-изотропными (ось симметрии сонаправлена с осью симметрии неоднородности) и могут быть представлены как линейные комбинации элементов тензорного базиса $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_6$ [18]:

$$\mathbf{H} = \sum_{k=1}^6 h_k \mathbf{T}_k, \quad \mathbf{Q} = \sum_{k=1}^6 q_k \mathbf{T}_k. \quad (4)$$

Элементы базиса имеют следующий вид:

$$\mathbf{T}_1 = \boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}, \quad \mathbf{T}_2 = \frac{1}{2} \left((\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta})_{(1,4)}^T + (\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta})_{(2,4)}^T - \boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta} \right),$$

$$\mathbf{T}_3 = \boldsymbol{\theta}\mathbf{nn}, \quad \mathbf{T}_4 = \mathbf{nn}\boldsymbol{\theta}, \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_5 = \frac{1}{4} \left(\mathbf{n}\boldsymbol{\theta}\mathbf{n} + (\mathbf{n}\boldsymbol{\theta}\mathbf{n})_{(1,2)(3,4)}^T + (\boldsymbol{\theta}\mathbf{nn})_{(1,4)}^T + (\boldsymbol{\theta}\mathbf{nn})_{(2,3)}^T \right),$$

$$\mathbf{T}_6 = \mathbf{nnnn},$$

где $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{I} - \mathbf{nn}$ (\mathbf{I} – единичный тензор второго ранга) – проектор на плоскость, ортогональную орту оси симметрии \mathbf{n} .

Введенный базис позволяет представить трансверсально-изотропный тензор $\mathbf{B} = \sum b_i \mathbf{T}_i$ (суммирование по повторяющемуся индексу от 1 до 6) и обратный к нему в одном базисе [17]:

$$\mathbf{B}^{-1} = \frac{b_6}{2\Delta} \mathbf{T}_1 + \frac{1}{b_2} \mathbf{T}_2 - \frac{b_3}{\Delta} \mathbf{T}_3 -$$

$$- \frac{b_4}{\Delta} \mathbf{T}_4 + \frac{4}{b_5} \mathbf{T}_5 + \frac{2b_1}{\Delta} \mathbf{T}_6, \quad (6)$$

где $\Delta = 2(b_1 b_6 - b_3 b_4)$.

Таким образом, определение тензоров \mathbf{Q} и \mathbf{H} для поры или микротрещины сводится к определению компонент тензора \mathbf{Q} , которые в случае сфероидального включения вычисляются следующим образом [19]:

$$q_1 = \mu^0 \left[4\kappa - 1 - 2(3\kappa - 1)f_0 - 2\kappa f_1 \right],$$

$$q_2 = 2\mu^0 \left[1 - (2 - \kappa)f_0 - \kappa f_1 \right],$$

$$q_3 = q_4 = 2\mu^0 \left[(2\kappa - 1)f_0 + 2\kappa f_1 \right],$$

$$q_5 = 4\mu^0 \left[f_0 + 4\kappa f_1 \right], \quad (7)$$

$$q_6 = 8\mu^0 \kappa \left[f_0 - f_1 \right], \quad \kappa = (1 - \nu^0) / 2,$$

где μ^0, ν^0 – модуль сдвига и коэффициент Пуассона матрицы, соответственно.

Параметры f_0 и f_1 зависят от соотношения длин полуосей сфероида $\gamma = a_3/a$ (a_3 – полуось вращения) следующим образом:

$$f_0 = \frac{1 - g}{2(1 - \gamma^{-2})},$$

$$f_1 = \frac{1}{4(1 - \gamma^{-2})^2} \left[(2 + \gamma^{-2})g - 3\gamma^{-2} \right],$$

где

$$g = \begin{cases} \frac{1}{\gamma\sqrt{1-\gamma^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}, & \gamma \leq 1; \\ \frac{1}{2\gamma\sqrt{\gamma^2-1}} \ln \left(\frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma - \sqrt{\gamma^2-1}} \right), & \gamma \geq 1. \end{cases}$$

Для сферической неоднородности $\gamma = 1$, $g = 1$, $f_0 = 1/3$, $f_1 = 1/15$. Тензор вклада сферической поры в податливость \mathbf{H}_p является изотропным и может быть представлен в следующем виде:

$$\mathbf{H}_p = \frac{15(1 - \nu)}{2\mu} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{10(1 + \nu)} \frac{1}{3} \mathbf{\Pi} + \frac{1}{7 - 5\nu} \left(\mathbf{J} - \frac{1}{3} \mathbf{\Pi} \right) \right], \quad (8)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор второго ранга,

$$\mathbf{J} = \frac{1}{2} \left((\mathbf{\Pi})_{(1,4)}^T + (\mathbf{\Pi})_{(2,4)}^T \right)$$

– единичный тензор четвертого ранга.

Тензоры $\mathbf{\Pi}$ и \mathbf{J} можно представить в трансверсально-изотропном базисе следующим образом [17]:

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4 + \mathbf{T}_6, \quad (9)$$

$$\mathbf{J} = \frac{1}{2} \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + 2\mathbf{T}_5 + \mathbf{T}_6.$$

Эффективные свойства металлов со сфероидальными микротрещинами и порами

Эффективные свойства гетерогенных материалов могут определяться с помощью различных методов, исторический обзор которых можно найти, например, в книге [20], а анализ современного состояния проблемы – в монографии [17]. Все аналитические методы представляют собой приближенное решение, тогда как точное решение можно получить только численно для конкретных материалов с известной микроструктурой. К наиболее известным аналитическим методам относятся следующие:

приближение без учета взаимодействия между неоднородностями,

метод эффективной среды, дифференциальная схема,

метод эффективного поля (к которому можно отнести схемы Мори – Танака и Канауна – Левина),

схема Максвелла.

Перечисленные методы различаются способом учета взаимовлияния множественных неоднородностей и имеют границы применимости, определяемые симметрией материала, формой и ориентацией включений. Схема Максвелла представляется оптимальной при описании вклада неоднородностей, различных по форме и ориентации [21].

Найдем эффективный тензор податливости по схеме Максвелла в терминах тензоров вклада [21]:

$$\mathbf{S}^{eff} = \mathbf{S}^0 + \left\{ \left[\frac{1}{V_{\Omega}} \sum_i V_i \mathbf{H}_i \right]^{-1} - \mathbf{Q}_{\Omega} \right\}^{-1}, \quad (10)$$

где \mathbf{Q}_{Ω} – второй тензор Хилла, определенный для гомогенизированной области Ω , содержащей изолированные неоднородности и обладающей искомыми эффективными свойствами.

В отсутствие \mathbf{Q}_{Ω} эффективный тензор податливости совпадает со значением, определенным без учета взаимодействия неоднородностей.

Определим суммарный вклад изолированных неоднородностей в податливость. Если неоднородности имеют одинаковую форму и размер, а также ориентированы различным образом, то их суммарный вклад можно определить как произведение осредненной величины вклада на объемную долю неоднородностей [17]. Для сферических включений осредненное значение тензора вклада совпадает с тензором вклада отдельной сферической поры \mathbf{H}_p в силу симметрии. В случае присутствия в материале сфероидальных микротрещин и сферических пор их суммарный вклад будет определяться как

$$\frac{1}{V} \sum_i V_i \mathbf{H}_i = \varphi_{mc} \langle \mathbf{H}_{mc} \rangle + \varphi_p \mathbf{H}_p, \quad (11)$$

где φ_{mc} , φ_p – объемные доли сплюснутых сфероидов и сфер соответственно, $\langle \mathbf{H}_{mc} \rangle$ – осредненное значение суммарного тензора вклада микротрещин в податливость.

Для определения $\langle \mathbf{H}_{mc} \rangle$ достаточно осреднить элементы тензорного базиса, т. е.

$$\langle \mathbf{H}_{mc} \rangle = \sum_{k=1}^6 h_{mc(k)} \langle \mathbf{T}_k \rangle.$$

При наличии преимущественного направления \mathbf{m} , оси симметрии сфероидальных микротрещин \mathbf{n} имеют тенденцию совпадать с \mathbf{m} с некоторым отклонением, задаваемым параметром рассеяния λ .

Введем функцию плотности распределения ориентации осей симметрии сфероидов по полусфере ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) согласно [22]:

$$\Psi_{\lambda}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left[(\lambda^2 + 1) e^{-\lambda\theta} + \lambda e^{-\lambda\pi/2} \right]. \quad (12)$$

При $\lambda = 0$ микротрещины имеют произвольную ориентацию в представительном объеме и материал ведет себя изотропно, при $\lambda \rightarrow \infty$ оси симметрии микротрещин направлены строго вдоль преимущественного направления и материал является трансверсально-изотропным с осью симметрии, совпадающей с \mathbf{m} . Для осреднения элементов тензорного базиса проинтегрируем их по поверхности полусферы единичного радиуса $\tilde{\Omega}_{1/2}$:

$$\langle \mathbf{T}_i \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{\tilde{\Omega}_{1/2}} \mathbf{T}_i d\tilde{\Omega}_{1/2}. \quad (13)$$

При произвольной ориентации осей симметрии сфероидов \mathbf{n} в некоторой плоскости, ортогональной \mathbf{m} , материал является трансверсально-изотропным, а его ось симметрии сонаправлена с \mathbf{m} . Для осреднения элементов тензорного базиса проинтегрируем их по единичной окружности l_1 , лежащей в ортогональной \mathbf{m} плоскости:

$$\langle \mathbf{T}_i \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{l_1} \mathbf{T}_i dl_1. \quad (14)$$

Осредненные значения элементов трансверсально-изотропного базиса представлены в Приложении.

Вопрос выбора формы гомогенизированной области Ω , используемой в схеме Максвелла для учета взаимодействия неоднородностей, детально обсуждается в статье [22].

В случае сфероидальных неоднородностей данная область также является сфероидом с соотношением длин полуосей, выраженным как

$$\gamma_{\Omega} = \begin{cases} \frac{\sum_i V_i Q_{3333}^{(i)}}{\sum_i V_i Q_{1111}^{(i)}}, & \text{если } \frac{\sum_i V_i Q_{3333}^{(i)}}{\sum_i V_i Q_{1111}^{(i)}} \leq 1; \\ \frac{\sum_i V_i P_{1111}^{(i)}}{\sum_i V_i P_{3333}^{(i)}}, & \text{если } \frac{\sum_i V_i Q_{3333}^{(i)}}{\sum_i V_i Q_{1111}^{(i)}} > 1, \end{cases} \quad (15)$$

где Q_{ijkl} , P_{ijkl} – компоненты тензоров Хилла \mathbf{Q} и \mathbf{P} соответственно.

В общем случае форма гомогенизированной области зависит от концентрации, ориентации и формы неоднородностей. При изотропном распределении неоднородностей по ориентации, форма является сферической; в ином случае, при наличии в материале одинаковых по размерам сферических пор и одинаковых по размерам и форме сфероидальных микротрещин, необходимо определить величину

$$\frac{1}{V} \sum_i V_i \mathbf{Q}_i = \varphi_{mc} \langle \mathbf{Q}_{mc} \rangle + \varphi_p \mathbf{Q}_p, \quad (16)$$

$$\langle \mathbf{Q}_{mc} \rangle = \sum_{k=1}^6 q_{mc(k)} \langle \mathbf{T}_k \rangle.$$

После нахождения компонент эффективного тензора податливости S_{ijkl}^{eff} можно найти эффективные модули Юнга. Примем для определенности, что ось симметрии материала совпадает с направлением \mathbf{e}_3 декартового базиса ($\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$).

Тогда эффективные модули Юнга трансверсально-изотропного материала $E_{11}^{eff} = E_{22}^{eff}, E_{33}^{eff}$ можно вычислить следующим образом:

$$E_{11}^{eff} = E_{22}^{eff} = \frac{1}{S_{1111}^{eff}}, \quad E_{33}^{eff} = \frac{1}{S_{3333}^{eff}}. \quad (17)$$

Результаты и их обсуждение

В данной работе были определены эффективные упругие свойства стали с модулем сдвига $\mu^0 = 80$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu^0 = 0,3$. Модуль Юнга стали E^0 следует выражению

$$E^0 = 2\mu^0(1 + \nu^0).$$

При произвольном распределении неоднородностей по ориентациям материал будет изотропным, т.е.

$$\mathbf{S}^{eff} = K^{eff} \mathbf{\Pi} + \mu^{eff} \left(\mathbf{J} - \frac{1}{3} \mathbf{\Pi} \right), \quad (18)$$

где K^{eff}, μ^{eff} – эффективные величины коэффициента объемного сжатия и модуля сдвига соответственно.

Полученные зависимости модулей $K^{eff}/K^0, \mu^{eff}/\mu^0$ от пористости материала φ для сферической поры ($\gamma = 1$) и сфероидальной микротрещины (при $\gamma = 0,1$) представлены на рис. 1, а. Видно, что пористость материала при наличии в нем сферических неоднородностей теоретически может достигать 100 % (при этом материал исчезает). В случае микротрещин, имеющих форму сплюснутых сфероидов, упругие модули стремятся

к нулю при достижении значений пористости, меньшей 100 % (около 26 % при $\gamma = 0,1$). Отрицательные значения модулей упругости при больших концентрациях неоднородностей свидетельствуют о том, что для данного материала задача гомогенизации не может быть решена корректно.

Таким образом, допустимая пористость материала определяется соотношением длин полуосей микротрещин. Для учета такой корреляции можно ввести в модель плотность трещин

$$\rho = (4/3)\pi a^3 N/V$$

(N – количество микротрещин) [17], связанную с пористостью ϕ соотношением $\phi = \rho \gamma$.

Зависимости модулей K^{eff}/K^0 и μ^{eff}/μ^0 от плотности трещин представлены на рис. 1, *b*.

Для возможного объяснения ограниченного допустимого значения пористости, была исследована зависимость эффективно-го модуля сдвига μ_{12}^{eff}/μ^0 от пористости при различных значениях параметра рассеяния λ . Рассмотрены сфероидальные микротрещины с $\gamma = 0,10$ и $0,05$. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Согласно представленным результатам, при одном и том же значении соотношения длин полуосей сфероида γ пористость материала теоретически может достигать 100 % при наличии в нем параллельно ориентированных микротрещин ($\lambda \rightarrow \infty$), тогда

как при отклонении микротрещин от преимущественного направления допустимая пористость уменьшается и становится минимальной при изотропном распределении ($\lambda = 0$). При сравнении рис. 2, *a* и *b* также видно, что для сфероидов с большим значением γ допустимая пористость выше. По всей видимости, при достижении некоторого значения пористости, обусловленного как степенью отклонения сфероидальных микротрещин от преимущественной ориентации, так и степенью их сплюснутости, множественные узкие микротрещины не могут рассматриваться как изолированные. Поскольку это делается при использовании самосогласованных схем (к которым относится в том числе и метод Максвелла), то, следовательно, возникает необходимость учета взаимовлияния неоднородностей более точными методами.

В данной работе была определена зависимость эффективных модулей Юнга E_{ii}^{eff}/E^0 от пористости материала ϕ для трех вариантов распределения неоднородностей по ориентациям:

- изотропное распределение (I),
- наличие преимущественного направления с параметром рассеяния λ (II),
- произвольное распределение осей симметрии неоднородностей в некоторой плоскости (III).

Предполагалось, что в материале имеется два типа неоднородностей: микротрещины,

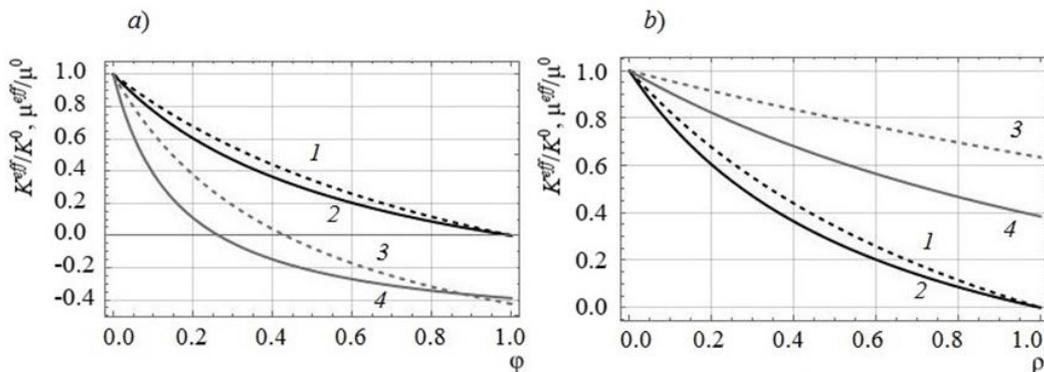


Рис. 1. Зависимости модулей K^{eff}/K^0 (сплошные линии) и μ^{eff}/μ^0 (пунктирные линии) от пористости материала (*a*) и плотности трещин (*b*). Поры моделируются сферами (1, 2), микротрещины моделируются сфероидами с соотношением длин полуосей $\gamma = 0,1$ (3, 4)



имеющие форму сплюснутых сфероидов с $\gamma = 0,1$, и сферические поры.

Было принято, что значения суммарной пористости ϕ всех неоднородностей лежат в пределах от 0 до 10 %.

Был рассмотрен материал со следующими типами микроструктуры:

присутствуют только сплюснутые сфероиды ($\phi_{mc} = \phi, \phi_p = 0$);

суммарный объем сплюснутых сфероидов относится к суммарному объему пор как 2 : 1 ($\phi_{mc} = 2\phi/3, \phi_p = \phi/3$);

суммарный объем сплюснутых сфероидов равен суммарному объему пор ($\phi_{mc} = \phi/2 = \phi_p$);

присутствуют только поры ($\phi_{mc} = 0, \phi_p = \phi$).

Результаты расчетов, учитывающих представленные условия, приведены на рис. 3. Как и следовало ожидать, во всех случаях увеличение пористости приводит к снижению упругих модулей. Видно, что при изотропном распределении (рис. 3, *a*) поры оказывают меньшее влияние на значение модуля Юнга, чем микротрещины при том же значении ϕ . Например, если $\phi = 0,10$, то значение модуля $E_{ii}^{eff} / E^0 \approx 0,82$ при $\phi_{mc} = 0, \phi_p = \phi$ и $E_{ii}^{eff} / E^0 \approx 0,58$ при $\phi_{mc} = \phi, \phi_p = 0$.

При наличии преимущественного направления ориентации микротрещин в материале (рис. 3, *b, c*) модуль Юнга в направлении оси симметрии материала уменьшается сильнее, чем модуль Юнга в плоскости изотропии. Узкие микротрещины оказыва-

ют больший, по сравнению с порами, вклад в величину E_{33}^{eff} и меньший – в E_{11}^{eff} . Наоборот, при распределении осей симметрии микротрещин в плоскости изотропии (рис. 3, *d, e*) модуль Юнга в направлении оси симметрии материала уменьшается в меньшей степени, по сравнению с модулем Юнга в плоскости изотропии. Узкие микротрещины оказывают больший, по сравнению с порами, вклад в величину E_{11}^{eff} и меньший – в E_{33}^{eff} .

Далее, нами изучалась зависимость эффективных модулей Юнга E_{ii}^{eff} / E^0 от соотношения длин полуосей микротрещин γ . Увеличение параметра γ от 0 до 1 описывает изменение формы сфероида от дискообразной до сферической. Как показано выше, в случае узких микротрещин общая пористость не может быть произвольной, а потому концентрация трещин была принята постоянной и, таким образом, общая пористость варьировалась за счет изменения значений γ .

Было принято, что плотность трещин $\rho = 0,1$; в этом случае при значении $\gamma = 0,1$ общая пористость материала составляет 1 %, что дает наилучшее приближение к экспериментальным данным.

Расчетные результаты для рассмотренных в работе случаев распределения неоднородностей по ориентациям представлены на рис. 4. Видно (см. рис. 4, *a, b*), что при

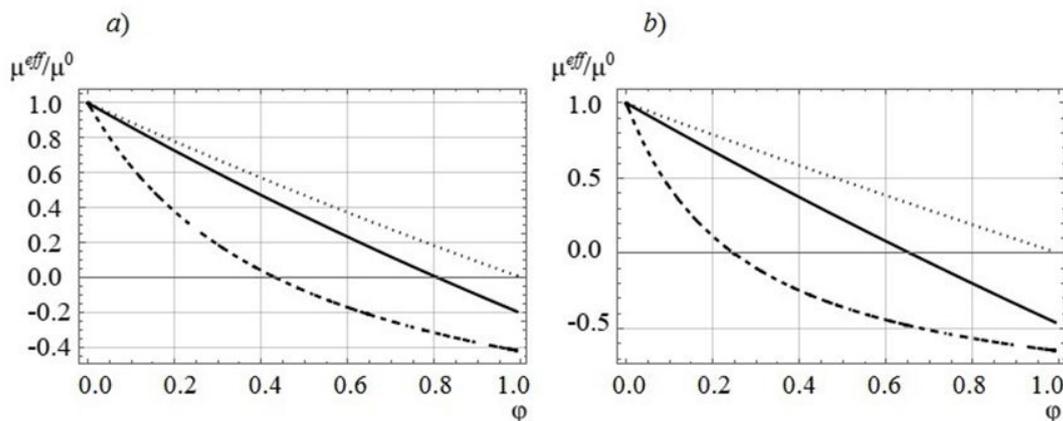


Рис. 2. Зависимости эффективного модуля сдвига μ_{12}^{eff} / μ^0 от пористости материала при соотношении длин полуосей сфероидов $\gamma = 0,10$ (*a*) и $\gamma = 0,05$ (*b*). Параметр рассеяния $\lambda = 0$ (пунктирные линии), $\lambda = 10$ (сплошные линии) и $\lambda \rightarrow \infty$ (точечные линии)

$\lambda > 0$ наличие сплюснутых сфероидов приводит к более существенному снижению модуля Юнга в направлении оси симметрии и менее существенному – в плоскости изотропии. Например, значения модулей составляют $E_{33}^{eff}/E_0 \approx 0,86$, $E_{11}^{eff}/E_0 \approx 0,92$ при $\lambda = 10$, $\gamma = 0,5$. В случае произвольного распределения осей симметрии микротрещин по ориентациям в некоторой плоскости (см. рис. 4, с) модуль Юнга в плоскости изотропии материала оказывается более чувствительным к уменьшению соотношения длин полуосей сфероидов γ , чем модуль Юнга в

направлении оси симметрии. Например, получено, что $E_{11}^{eff}/E_0 \approx 0,89$, $E_{33}^{eff}/E_0 \approx 0,92$ при $\gamma = 0,5$. Для всех вариантов распределения неоднородностей по ориентациям наблюдается снижение модулей Юнга при увеличении γ , поскольку общая пористость материала линейно зависит от параметра γ .

Отдельно был рассмотрен случай преимущественной ориентации сфероидов и исследована зависимость эффективных свойств материала от параметра рассеяния λ , где взяты значения параметров $\gamma = 0,1$, $\varphi = 0,01$. Результаты расчетов представ-

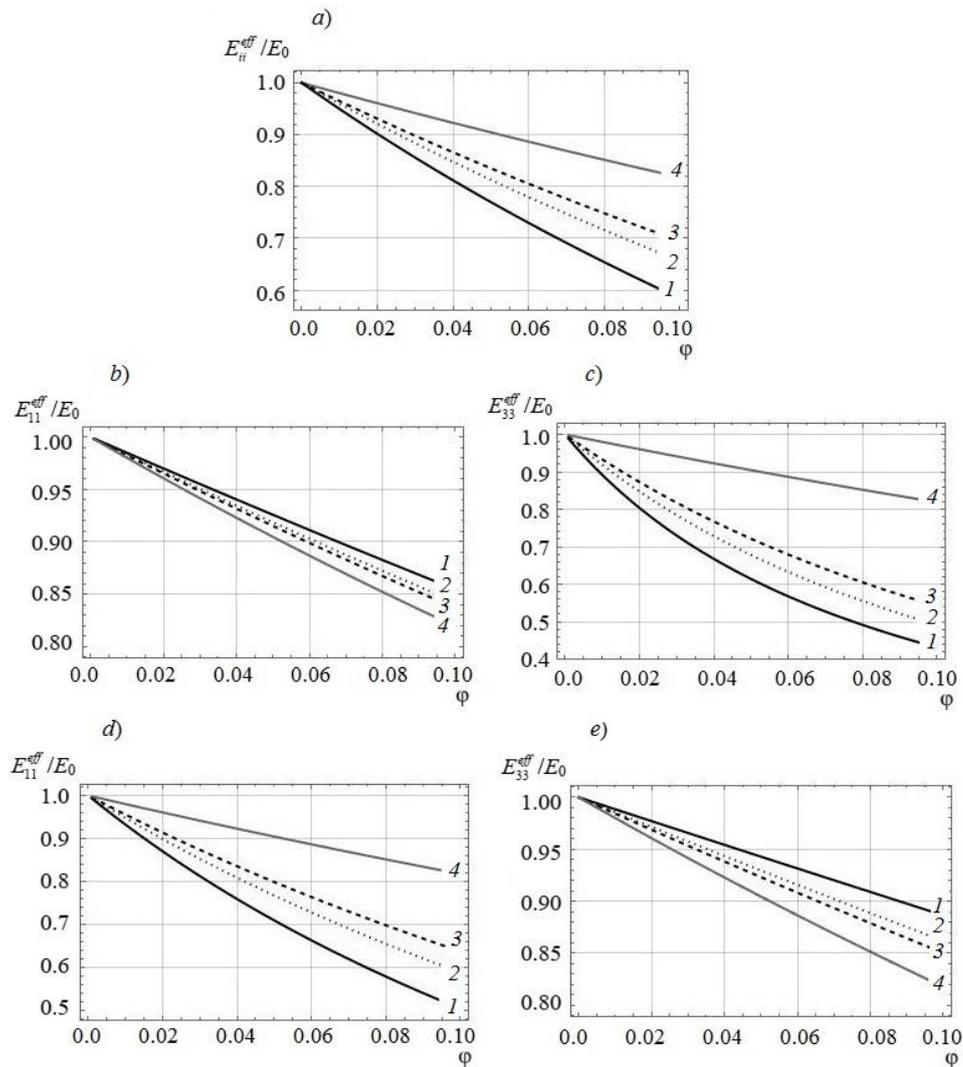


Рис. 3. Зависимости модулей E_{ii}^{eff}/E_0 от пористости материала при различных вариантах распределения неоднородностей по ориентациям ($\gamma = 0,1$): I (a), II (при $\lambda = 10$) (b, c) и III (d, e) (см. пояснения в тексте).

Рассмотрены следующие типы микроструктуры: $\varphi_{mc} = \varphi$, $\varphi_p = 0$ (1);

$\varphi_{mc} = 2\varphi/3$, $\varphi_p = \varphi/3$ (2); $\varphi_{mc} = \varphi/2 = \varphi_p$ (3); $\varphi_{mc} = 0$, $\varphi_p = \varphi$ (4)

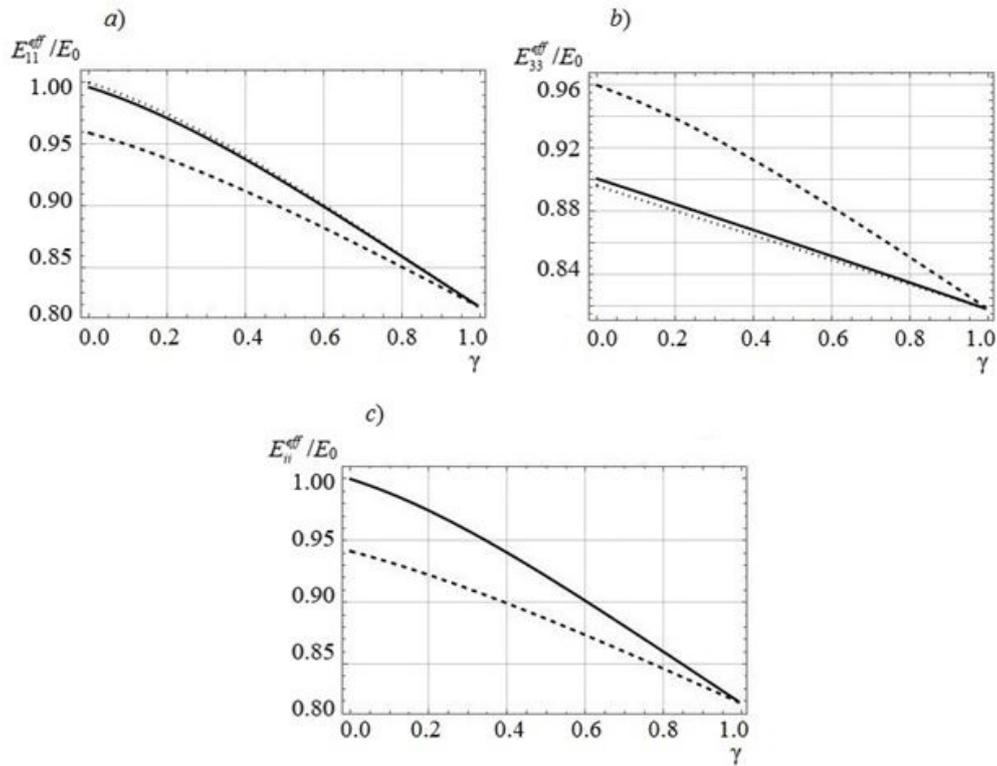


Рис. 4. Зависимости модулей E_{ii}^{eff}/E_0 от параметра γ при различном распределении неоднородностей по ориентациям (плотность трещин $\rho = 0,1$): I, II (a, b) и III (c) (см. пояснения в тексте); a, b – параметр рассеяния $\lambda = 0$ (пунктирные линии), $\lambda = 10$ (сплошные линии) и $\lambda \rightarrow \infty$ (точечные линии); c – приведены модули E_{11}^{eff}/E_0 (пунктирная линия) и E_{33}^{eff}/E_0 (сплошная линия)

лены на рис. 5. При значении $\lambda = 0$ материал является изотропным и характеризуется эффективным модулем Юнга $E_{ii}^{eff}/E_0 \approx 0,95$. Из представленных на рис. 5 графиков видно, что при большем отклонении осей симметрии неоднородностей

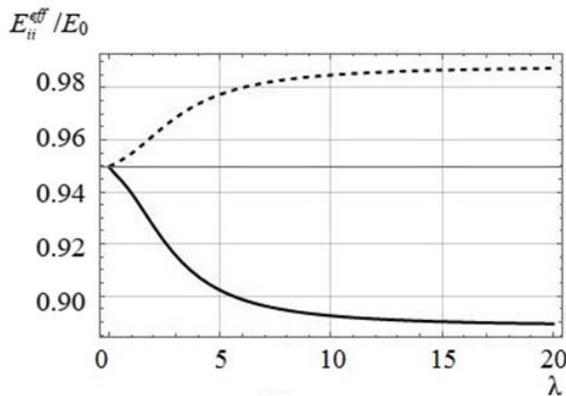


Рис. 5. Зависимости модулей E_{11}^{eff}/E_0 (пунктирная линия) и E_{33}^{eff}/E_0 (сплошная линия) от параметра рассеяния; приняты значения параметров $\gamma = 0,1, \varphi = 0,01$

от преимущественного направления (при уменьшении λ) наблюдается более существенное изменение значений эффективных модулей. При этом характер изменения модулей Юнга в направлении оси симметрии и в плоскости изотропии различен: модуль Юнга в направлении оси симметрии материала снижается при выравнивании неоднородностей ($\lambda \rightarrow \infty$), тогда как модуль Юнга в плоскости изотропии снижается, наоборот, при увеличении разброса по ориентациям ($\lambda \rightarrow 0$).

Заключение

В работе представлен анализ изменения эффективных модулей Юнга металлов с микроструктурой, характерной для этих материалов, подверженных водородной деградации, а именно: при наличии в них микротрещин, возникающих между соседними зернами, и пор. Микротрещины моделиро-

вались сплюснутыми сфероидами, а поры – сферами. Задача гомогенизации решалась с помощью схемы Максвелла в терминах тензоров вклада. Исследовались зависимости эффективных упругих свойств от пористости материала, степени сплюснутости сфероидов и распределения неоднородностей по ориентациям. Показано, что эффективные модули Юнга существенно зависят от соотношения длин полуосей сфероидальных микротрещин и пористости материала. В зависимости от ориентации микротрещин в материале эффективные модули Юнга в разных направлениях могут меняться в большей или меньшей степени, что говорит о важности учета структуры металлических изделий (например, слоистости металла) и, следовательно, метода их изготовления (например, наличия прокатки) при определении характеристик материалов, насыщаемых водородом. Более того, в зависимости от ориентации микротрещин они могут оказывать больший или меньший, по сравнению с порами, вклад при одной и той же концентрации микротрещин и пор. Помимо этого показано, что при решении задачи гомогенизации необходимо учитывать корреляцию между пористостью материала и формой микротрещин.

Приложение

Осредненные значения элементов трансверсально-изотропного базиса

При изотропном распределении неоднородностей по ориентациям осредненные значения элементов трансверсально-изотропного базиса имеют следующий вид [16]:

$$\langle \mathbf{T}_1 \rangle = \frac{1}{15} [7\mathbf{T}_1 + 2\mathbf{T}_2 + 6(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) + 4\mathbf{T}_5 + 8\mathbf{T}_6],$$

$$\langle \mathbf{T}_2 \rangle = \frac{1}{15} [\mathbf{T}_1 + 6\mathbf{T}_2 - 2(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) + 12\mathbf{T}_5 + 4\mathbf{T}_6],$$

$$\langle \mathbf{T}_3 \rangle = \langle \mathbf{T}_4 \rangle = \frac{1}{15} [3\mathbf{T}_1 - 2\mathbf{T}_2 + 4(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) - 4\mathbf{T}_5 + 2\mathbf{T}_6],$$

$$\langle \mathbf{T}_5 \rangle = \frac{1}{30} [\mathbf{T}_1 + 6\mathbf{T}_2 - 2(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) + 12\mathbf{T}_5 + 4\mathbf{T}_6],$$

$$\langle \mathbf{T}_6 \rangle = \frac{1}{15} [2(\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2) + \mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4 + 4\mathbf{T}_5 + 3\mathbf{T}_6].$$

При наличии преимущественной ориентации осей симметрии неоднородностей вдоль оси \mathbf{m} с параметром рассеяния λ , осредненные значения элементов трансверсально-изотропного базиса выражаются как

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{T}_1 \rangle = & (1 - 2g_1(\lambda) + g_3(\lambda))\mathbf{T}_1 + g_3(\lambda)\mathbf{T}_2 + \\ & + (1 - g_1(\lambda) - g_2(\lambda) + g_4(\lambda))(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) + \\ & + 4g_4(\lambda)\mathbf{T}_5 + (1 - 2g_2(\lambda) + g_5(\lambda))\mathbf{T}_6, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{T}_2 \rangle = & \frac{g_3(\lambda)}{2}\mathbf{T}_1 + \left(1 - 2g_1(\lambda) + \frac{g_3(\lambda)}{2}\right)\mathbf{T}_2 + \\ & + \frac{1}{2}(g_1(\lambda) + g_2(\lambda) + g_4(\lambda) - 1)(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) + \\ & + 2(g_4(\lambda) - g_1(\lambda) - g_2(\lambda) + 1)\mathbf{T}_5 + \\ & + \frac{1}{2}(g_5(\lambda) - 2g_2(\lambda) + 1)\mathbf{T}_6, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{T}_3 \rangle = & (g_1(\lambda) - g_3(\lambda))\mathbf{T}_1 - g_3(\lambda)\mathbf{T}_2 + \\ & + (g_2(\lambda) - g_4(\lambda))\mathbf{T}_3 + (g_1(\lambda) - g_4(\lambda))\mathbf{T}_4 - \\ & - 4g_4(\lambda)\mathbf{T}_5 + (g_2(\lambda) - g_5(\lambda))\mathbf{T}_6, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{T}_4 \rangle = & (g_1(\lambda) - g_3(\lambda))\mathbf{T}_1 - g_3(\lambda)\mathbf{T}_2 + \\ & + (g_1(\lambda) - g_4(\lambda))\mathbf{T}_3 + (g_2(\lambda) - g_4(\lambda))\mathbf{T}_4 - \\ & - 4g_4(\lambda)\mathbf{T}_5 + (g_2(\lambda) - g_5(\lambda))\mathbf{T}_6, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{T}_5 \rangle = & \left(\frac{g_1(\lambda)}{2} - g_3(\lambda)\right)\mathbf{T}_1 + \\ & + (g_1(\lambda) - g_3(\lambda))\mathbf{T}_2 - g_4(\lambda)(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) + \\ & + (g_1(\lambda) + g_2(\lambda) - 4g_4(\lambda))\mathbf{T}_5 + \\ & + (g_2(\lambda) - g_5(\lambda))\mathbf{T}_6, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{T}_6 \rangle = & g_3(\lambda)(\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2) + \\ & + g_4(\lambda)(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4 + 4\mathbf{T}_5) + g_5(\lambda)\mathbf{T}_6. \end{aligned}$$

Здесь

$$g_1(\lambda) = \frac{18 - \lambda e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} (\lambda^2 + 3)}{6(\lambda^2 + 9)},$$

$$g_2(\lambda) = \frac{\left(3 + \lambda e^{-\frac{\pi\lambda}{2}}\right) (\lambda^2 + 3)}{3(\lambda^2 + 9)},$$

$$g_3(\lambda) = \frac{30}{(\lambda^2 + 9)(\lambda^2 + 25)} - \lambda e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} \frac{(7\lambda^4 + 178\lambda^2 + 435)}{60(\lambda^2 + 9)(\lambda^2 + 25)},$$

$$g_4(\lambda) = \frac{3(5 + \lambda^2)}{(\lambda^2 + 9)(\lambda^2 + 25)} + \lambda e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} \frac{(\lambda^4 + 19\lambda^2 + 30)}{15(\lambda^2 + 9)(\lambda^2 + 25)},$$

$$g_5(\lambda) = \frac{(\lambda^4 + 22\lambda^2 + 45)}{(\lambda^2 + 9)(\lambda^2 + 25)} +$$

$$+ \lambda e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} \frac{(\lambda^4 + 34\lambda^2 + 105)}{5(\lambda^2 + 9)(\lambda^2 + 25)}.$$

При произвольной ориентации осей симметрии неоднородностей в ортогональной оси \mathbf{m} плоскости, осредненные значения элементов трансверсально-изотропного базиса выражаются следующим образом [16]:

$$\langle \mathbf{T}_1 \rangle = \frac{1}{4} [\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + 2(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) + 4\mathbf{T}_6],$$

$$\langle \mathbf{T}_2 \rangle = \frac{1}{8} [\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 - 2(\mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4) + 8\mathbf{T}_5 + 4\mathbf{T}_6],$$

$$\langle \mathbf{T}_3 \rangle = \frac{1}{4} [\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2 + 2\mathbf{T}_4],$$

$$\langle \mathbf{T}_4 \rangle = \frac{1}{4} [\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2 + 2\mathbf{T}_3],$$

$$\langle \mathbf{T}_5 \rangle = \frac{1}{4} [\mathbf{T}_2 + 2\mathbf{T}_5],$$

$$\langle \mathbf{T}_6 \rangle = \frac{1}{4} [\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2].$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Koyama M., Akiyama E., Lee Y.K., Raabe D., Tsuzaki K.** Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. No. 17. Pp. 12706–12723.

2. **Яковлев Ю.А., Третьяков Д.А., Фролова К.П.** Водородная диагностика элементов конструкций и инженерных конструкций // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2019. № 3. С. 117–120.

3. **Shen C.H., Shewmon P.G.** A mechanism for hydrogen-induced intergranular stress corrosion cracking in alloy 600 // Metallurgical Transactions. A. 1990. Vol. 21. No. 5. Pp. 1261–1271.

4. **Koyama M., Springer H., Merzlikin S.V., Tsuzaki K., Akiyama E., Raabe D.** Hydrogen embrittlement associated with strain localization in a precipitation-hardened Fe–Mn–Al–C light

weight austenitic steel // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39. No. 9. Pp. 4634–4646.

5. **Kuhr B., Farkas D., Robertson I.M.** Atomistic studies of hydrogen effects on grain boundary structure and deformation response in FCC Ni // Computational Materials Science. 2016. Vol. 122. September. Pp. 92–101.

6. **Villalobos J.C., Serna S.A., Campillo B., López-Martínez E.** Evaluation of mechanical properties of an experimental microalloyed steel subjected to tempering heat treatment and its effect on hydrogen embrittlement // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. No. 1. Pp. 689–698.

7. **Merson E.D., Myagkikh P.N., Klevtsov G.V., Merson D.L., Vinogradov A.** Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the

hydrogen embrittled low-alloy steel // Engineering Fracture Mechanics. 2019. Vol. 210. 1 April. Pp. 342–357.

8. **Sun B., Krieger W., Rohwerder M., Ponge D., Raabe D.** Dependence of hydrogen embrittlement mechanisms on microstructure-driven hydrogen distribution in medium Mn steels // Acta Materialia. 2020. Vol. 183. 15 January. Pp. 313–328.

9. **Wasim M., Djukic M.B.** Hydrogen embrittlement of low carbon structural steel at macro-, micro- and nanolevels // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. No. 3. Pp. 2145–2156.

10. **Jothi S., Croft T.N., Wright L., Turnbull A., Brown S.G.R.** Multi-phase modelling of intergranular hydrogen segregation/trapping for hydrogen embrittlement // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40. No. 43. Pp. 15105–15123.

11. **Hoch B.O., Metsue A., Bouhattate J., Feugas X.** Effects of grain-boundary networks on the macroscopic diffusivity of hydrogen in polycrystalline materials // Computational Materials Science. 2015. Vol. 97. 1 February. Pp. 276–284.

12. **Knyazeva A.G., Grabovetskaya G.P., Mishin I.P., Sevostianov I.** On the micromechanical modelling of the effective diffusion coefficient of a polycrystalline material // Philosophical Magazine. 2015. Vol. 95. No. 19. Pp. 2046–2066.

13. **Архангельская Е.А., Лепов В.В., Ларионов В.П.** Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 5. С. 81–87.

14. **Ruales M., Martell D., Vazquez F., Just**

F.A., Sundaram P.A. Effect of hydrogen on the dynamic elastic modulus of gamma titanium aluminide // Journal of Alloys and Compounds. 2002. Vol. 339. No. 1–2. Pp. 156–161.

15. **Rahman K.M., Mohtadi-Bonab M.A., Ouellet R., Szpunar J.A.** Comparative study of the role of hydrogen on degradation of the mechanical properties of API X60, X60SS, and X70 pipeline steels // Steel Research International. 2019. Vol. 90. No. 8. P. 1900078.

16. **Kachanov M., Sevostianov I.** On quantitative characterization of microstructures and effective properties // International Journal of Solids and Structures. 2005. Vol. 42. No. 2. Pp. 309–336.

17. **Kachanov M., Sevostianov I.** Micromechanics of materials, with applications. Berlin, Germany: Springer, 2018. Vol. 249. 712 p.

18. **Канаун С.К., Левин В.М.** Метод эффективного поля в механике композитных материалов. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского гос. ун-та, 1993. 598 с.

19. **Sevostianov I., Kachanov M.** Compliance tensors of ellipsoidal inclusions // International Journal of Fracture. 1999. Vol. 96. No. 1. Pp. 3–7.

20. **Markov K.Z.** Elementary micromechanics of heterogeneous media // Heterogeneous Media. Birkhäuser, Boston, MA, 2000. Pp. 1–62.

21. **Sevostianov I., Kachanov M.** On some controversial issues in effective field approaches to the problem of the overall elastic properties // Mechanics of Materials. 2014. Vol. 69. No. 1. Pp. 93–105.

22. **Sevostianov I.** On the shape of effective inclusion in the Maxwell homogenization scheme for anisotropic elastic composites // Mechanics of Materials. 2014. Vol. 75. August. Pp. 45–59.

Статья поступила в редакцию 30.03.2020, принята к публикации 20.04.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ФРОЛОВА Ксения Петровна – младший научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация; аспирантка Высшей школы теоретической механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Большой проспект В.О., 61.

kspfrolova@gmail.com



REFERENCES

1. **Koyama M., Akiyama E., Lee Y.K., et al.**, Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels, *International Journal of Hydrogen Energy*. 42(17) (2017) 12706–12723.
2. **Yakovlev Yu.A., Tretyakov D.A., Frolova K.P.**, Hydrogen diagnostics structural elements and engineering constructions, *Methods of Control and Diagnostics in Mechanical Engineering*. (3) (2019) 117–120.
3. **Shen C.H., Shewmon P.G.**, A mechanism for hydrogen-induced intergranular stress corrosion cracking in alloy 600, *Metallurgical Transactions A*. 21(5) (1990) 1261–1271.
4. **Koyama M., Springer H., Merzlikin S.V., et al.**, Hydrogen embrittlement associated with strain localization in a precipitation-hardened Fe–Mn–Al–C light weight austenitic steel, *International Journal of Hydrogen Energy*. 39 (9) (2014) 4634–4646.
5. **Kuhr B., Farkas D., Robertson I.M.**, Atomistic studies of hydrogen effects on grain boundary structure and deformation response in FCC Ni, *Computational Materials Science*. 122 (September) (2016) 92–101.
6. **Villalobos J.C., Serna S.A., Campillo B., López-Martínez E.** Evaluation of mechanical properties of an experimental microalloyed steel subjected to tempering heat treatment and its effect on hydrogen embrittlement, *International Journal of Hydrogen Energy*. 42(1) (2017) 689–698.
7. **Merson E.D., Myagkikh P.N., Klevtsov G.V., et al.**, Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel, *Engineering Fracture Mechanics*. 210 (1 April) (2019) 342–357.
8. **Sun B., Krieger W., Rohwerder M., et al.**, Dependence of hydrogen embrittlement mechanisms on microstructure-driven hydrogen distribution in medium Mn steels, *Acta Materialia*. 183 (15 January) (2020) 313–328.
9. **Wasim M., Djukic M.B.**, Hydrogen embrittlement of low carbon structural steel at macro-, micro-and nanolevels, *International Journal of Hydrogen Energy*. 45 (3) (2020) 2145–2156.
10. **Jothi S., Croft T.N., Wright L., et al.**, Multi-phase modelling of intergranular hydrogen segregation/trapping for hydrogen embrittlement, *International Journal of Hydrogen Energy*. 40 (43) (2015) 15105–15123.
11. **Hoch B.O., Metsue A., Bouhattate J., Feaugas X.**, Effects of grain-boundary networks on the macroscopic diffusivity of hydrogen in polycrystalline materials, *Computational Materials Science*. 97 (1 February) (2015) 276–284.
12. **Knyazeva A.G., Grabovetskaya G.P., Mishin I.P., Sevostianov I.**, On the micromechanical modelling of the effective diffusion coefficient of a polycrystalline material, *Philosophical Magazin*. 95 (19) (2015) 2046–2066.
13. **Arkhangelskaya E.A., Lepov V.V., Larionov V.P.**, The connected model for delayed fracture of damaged media, *Physical Mesomechanics*. 4 (5) (2001) 75–80.
14. **Ruales M., Martell D., Vazquez F., et al.**, Effect of hydrogen on the dynamic elastic modulus of gamma titanium aluminide, *Journal of Alloys and Compounds*. 339 (1–2) (2002) 156–161.
15. **Rahman K.M., Mohtadi-Bonab M.A., Ouellet R., Szpunar J.A.**, Comparative study of the role of hydrogen on degradation of the mechanical properties of API X60, X60SS, and X70 pipeline steels, *Steel Research International*. 90 (8) (2019) 1900078.
16. **Kachanov M., Sevostianov I.**, On quantitative characterization of microstructures and effective properties, *International Journal of Solids and Structures*. 42 (2) (2005) 309–336.
17. **Kachanov M., Sevostianov I.**, *Micromechanics of materials, with applications*, Vol. 249, Springer, Berlin, Germany, 2018.
18. **Kanaun S.K., Levin V.M.**, *Metod effektivnogo polya v mekhanike kompozitnykh materialov [Effective field method in the mechanics of composite materials]*, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, 1993 (in Russian).
19. **Sevostianov I., Kachanov M.**, Compliance tensors of ellipsoidal inclusions, *International Journal of Fracture*. 96 (1) (1999) 3–7.
20. **Markov K.Z.**, Elementary micromechanics of heterogeneous media, In the book: *Heterogeneous Media*, Birkhäuser, Boston, MA, 2000.

21. **Sevostianov I., Kachanov M.**, On some controversial issues in effective field approaches to the problem of the overall elastic properties, *Mechanics of Materials*. 69 (1) (2014) 93–105.

22. **Sevostianov I.**, On the shape of effective inclusion in the Maxwell homogenization scheme for anisotropic elastic composites, *Mechanics of Materials*. 75 (August) (2014) 45–59.

Received 30.03.2020, accepted 20.04.2020.

THE AUTHOR

FROLOVA Ksenia P.

*Institute for Problems of Mechanical Engineering RAS, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
61 Bolshoi Ave. of V. Isl., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
kspfrolova@gmail.com*