

Д. С. Дудин, И. Э. Келлер

ОПИСАНИЕ СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ И ХЛОРИДНОЙ КОРРОЗИИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С УЧЁТОМ НАПРЯЖЕНИЙ. I. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

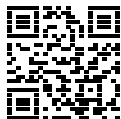
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Аннотация. Сульфидно-оксидная и хлоридная коррозия оказывает значительное влияние на ресурс деталей газотурбинных двигателей. Под воздействием высоких температур кислород и сера проникают через поверхность жаропрочного сплава, изменяя его физико-механические свойства, что при действии высоких внешних нагрузок приводит к разрушению. Взаимная диффузия компонентов и химические реакции изменяют локальный химический состав и плотность материала, создавая поля собственных деформаций и остаточных напряжений. Напряжения и их градиенты влияют на скорости процессов взаимной диффузии компонентов и химических реакций. Движение компонентов обусловлено конвективным переносом и диффузионными потоками относительно материала. Однако для описания взаимной диффузии компонентов в атомных кристаллах независимые диффузионные потоки определяются относительно маркеров — инертных частиц, не влияющих на химические и диффузионные процессы в материале. Формулируется связанная модель, совмещающая маркерный подход к описанию диффузии и материальный подход к описанию деформирования. В ней учитывается наиболее простой механизм сульфидно-оксидной коррозии двухкомпонентного жаропрочного сплава. Учитываются объемные деформации набухания материального объема вследствие диффузионных и химических процессов и сдвиговые упругопластические деформации металла и продуктов коррозии при высоких температурах, за счет которых в рассматриваемой расчетной схеме релаксируют напряжения. Решение термодинамического неравенства для рассматриваемых переменных состояния и процессов дает перекрестные члены и зависимость от градиента среднего напряжения в физических соотношениях для диффузионных потоков, зависимость скоростей химических реакций от среднего напряжения. В балансовые уравнения химического состава входит скорость конвективного перемещения материала. Предполагается, что эти элементы связанности модели будут важными для описания процесса сульфидно-оксидной и хлоридной коррозии металлических сплавов с учетом влияния технологических остаточных и эксплуатационных напряжений на диффузионные и химические процессы и возникновения собственных деформаций и остаточных напряжений вследствие этих процессов.

Ключевые слова: сульфидно-оксидная коррозия, модель, взаимная диффузия, напряжения, упругопластичность, химические реакции, связанные процессы

Дудин Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела; e-mail: dudin.d@icmm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1911-8899>; AuthorID: 1110725

Келлер Илья Эрнстович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела; e-mail: kie@icmm.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9914-8870>; AuthorID: 11695



для цитирования: Дудин Д. С., Келлер И. Э. Описание сульфидно-оксидной и хлоридной коррозии жаропрочных сплавов с учётом напряжений. I. Математическая модель // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2025. № 1(63). С. 123–133. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.003. EDN: BDZATO

Статья опубликована на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)*.

D. S. Dudin, I. E. Keller

DESCRIPTION OF SULFIDE-OXIDE AND CHLORIDE CORROSION OF HEAT-RESISTANT ALLOYS TAKING INTO ACCOUNT STRESSES. I. MATHEMATICAL MODEL

Institute of Continuous Media Mechanics of UB RAS, Perm, Russia

Abstract. Sulfide-oxide and chloride corrosion has a significant impact on the life of gas turbine engine parts. Under the influence of high temperatures, oxygen and sulfur penetrate through the surface of the heat-resistant alloy, changing its physico-mechanical properties, which leads to destruction under the influence of high external loads. The mutual diffusion of components and chemical reactions change the local chemical composition and density of the material, creating fields of intrinsic deformations and residual stresses. Stresses and its gradients affect the rates of mutual diffusion of components and chemical reactions. The motion of the components is caused by convective transport and diffusion flows relative to the material. However, to describe the mutual diffusion of components in atomic crystals, independent diffusion fluxes are determined relative to markers - inert particles that do not affect chemical and diffusion processes in the material. A related model is formulated that combines a marker approach to the description of diffusion and a material approach to the description of deformation. It takes into account the simplest mechanism of sulfide-oxide corrosion of a two-component heat-resistant alloy. Volumetric deformations of the swelling of the material volume due to diffusion and chemical processes and shear elastoplastic deformations of metal and corrosion products at high temperatures are taken into account, due to which stresses relax in the considered design scheme. The solution of the thermodynamic inequality for the considered state variables and processes gives cross terms and dependence on the average voltage gradient in physical relations for diffusion flows, the dependence of chemical reaction rates on the average voltage. The balance equations of chemical composition include the rate of convective movement of the material. It is assumed that these model connectivity elements will be important for describing the process of sulfide-oxide and chloride corrosion of metal alloys, taking into account the influence of technological residual and operational stresses on diffusion and chemical processes and the occurrence of intrinsic deformations and residual stresses due to these processes.

Keywords: high-temperature corrosion, model, interdiffusion, stresses, elastoplasticity, chemical reactions, coupled processes

Dmitrii S. Dudin, Leading Engineer of the Laboratory of Nonlinear Mechanics of Solids;
e-mail: dudin.d@icmm.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-1911-8899>; AuthorID: 1110725

Ilya E. Keller, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Nonlinear Mechanics of Solids; e-mail: kie@icmm.ru;

<https://orcid.org/0000-0001-9914-8870>; AuthorID: 11695

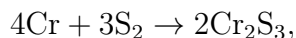


to cite this article: Dudin D. S., Keller I. E. Description of sulfide-oxide and chloride corrosion of heat-resistant alloys taking into account stresses. I. Mathematical model // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2025. No 1(63). p. 123–133. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.003

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение. Детали авиационных двигателей работают в условиях высоких температур, воздействия агрессивных продуктов сгорания топлива и морской соли и высоких механических нагрузок. Кислород вызывает образование тонкой плёнки оксидов на поверхности, в которой накапливаются повреждения. Сера и хлор из солевого расплава на поверхности проникают сквозь оксидную плёнку и вызывают формирование слоя сульфидов и хлоридов, стимулируя взаимную диффузию компонентов сплава, кислорода, серы и хлора и приводя к обеднению поверхностного слоя сплава легирующими элементами. Прогнозирование роста плёнки продуктов коррозии и напряжённо-деформированного состояния в ней требует постановки связанной модели, в которой учитывается взаимная диффузия компонентов, химические реакции и процесс деформирования, вызванный как эксплуатационными напряжениями, так и напряжениями хемодиффузионной природы. В настоящей работе формулируется подобная модель на основе подхода классической необратимой термодинамики многокомпонентных сред [1]. Здесь в качестве некоторого упрощения полагается, что поле (повышенной) температуры постоянно во времени и однородно, что правдоподобно для крейсерского режима работы авиационного двигателя.

1. Механизм сульфидно-оксидной коррозии. Для примера рассматривается сульфидно-оксидная коррозия стали $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{30}$ при 800° , в ходе которой образуется слоистая структура продуктов коррозии [2]. Для её описания предлагается следующий механизм (см. рис. 1), в котором учитываются три химических реакции, протекающих со скоростями $\dot{\ell}_i$, $i = 1, 2, 3$: окисление железа, окисление хрома и образование сульфида хрома



нумеруемые в соответствии с порядком перечисления. Процесс проходит в два этапа. На первом этапе молекулярный кислород диффундирует внутрь металла, где реагирует с ионами Fe и Cr, диффундирующими навстречу кислороду (рис. 1, а). За счёт взаимной диффузии компонентов снаружи формируется слой оксида железа, под которым возникает слой оксида хрома. При достижении критической поврежденности коррозионного слоя молекулярная сера диффундирует сквозь него, где на границе металл-оксид начинает реагировать с хромом и проникать вглубь металла с образованием сульфидного слоя (рис. 1, б).

Таким образом, модель учитывает семь компонентов, которые нумеруются в соответствии с порядком O_2 , Fe, Cr, S_2 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 и Cr_2S_3 . Коэффициенты перед k -ым компонентом в i -ой химической реакции в химических уравнениях (1) называются стехиометрическими коэффициентами ν_k^i . Далее принимается, что $\nu_k^i > 0$ соответствуют продуктам химических реакций, $\nu_k^i < 0$ задаётся для реагента, а при $\nu_k^i = 0$ компонента не участвует в химической реакции.

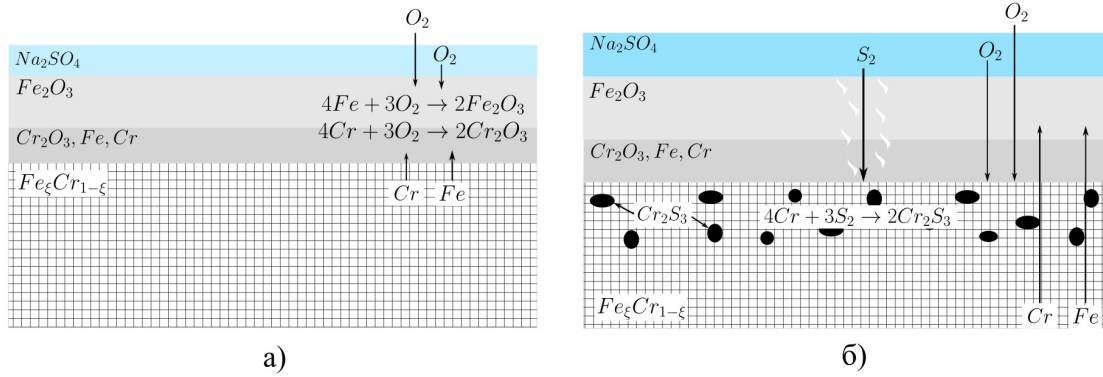


Рис. 1. Механизм сульфидно-оксидной коррозии жаропрочной стали: а) формирование оксидной плёнки, б) проникновение серы через оксидную плёнку и образование сульфидного слоя

2. Теоретическое описание взаимной диффузии. Химический состав материальной точки, содержащей n_k , $k = 1, \dots, 7$ моль компонентов с мольными массами m_k и мольными объёмами V_k , определяется плотностями компонентов ρ_k , $k = 1, \dots, 7$ либо массовыми долями $x_k = \rho_k/\rho$, $k = 1, \dots, 7$ и полной плотностью $\rho = \sum \rho_k$. Диффузионные потоки переменных химического состава могут быть определены относительно различных локальных систем отсчёта. В качестве одной из них может быть выбрана скорость материального объема

$$\mathbf{v} = \sum_{k=1}^7 x_k \mathbf{v}_k, \quad \sum_{k=1}^7 x_k = 1, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}_k$ — парциальная скорость k -го компонента.

В атомных кристаллах используется локальная система отсчета, связанная с маркерами — малыми инертными частицами, не диффундирующими и химически не реагирующими с компонентами кристалла [3]. Скорость маркеров обозначим $\mathbf{v}_m$ и определим диффузионные потоки $\mathbf{j}_k^m$ и $\mathbf{j}_k$ относительно маркеров и материала:

$$\mathbf{j}_k^m = \rho_k (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m), \quad \mathbf{j}_k = \rho_k (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}), \quad k = 1, \dots, 7.$$

Диффузионные потоки $\mathbf{j}_k$ в силу (2) являются сбалансированными $\sum_{k=1}^7 \mathbf{j}_k = 0$, а потоки $\mathbf{j}_k^m$ таковыми не являются. Связь рассматриваемых потоков дается соотношением [4]

$$\mathbf{j}_k = \mathbf{j}_k^m - x_k \sum_{i=1}^7 \mathbf{j}_i^m, \quad k = 1, \dots, 7 \quad (3)$$

и удовлетворяет условию сбалансированности потоков $\mathbf{j}_k$.

Связанную модель процессов взаимной диффузии и деформирования естественно ставить в терминах материальной скорости, поэтому используются балансовые уравнения переменных массового состава в виде

$$\rho \frac{dx_k}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{j}_k + m_k \sum_{i=1}^3 \nu_k^i \dot{\ell}_i, \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla, \quad k = 1, \dots, 7, \quad (4)$$

где ∇ — оператор градиента. Заметим, что полная плотность ρ элементарного материального объема сохраняется, несмотря на изменение химического состава и количества частиц в соответствующем ему пространственном объеме.

3. Напряжения и деформации. Напряжённое состояние характеризуется тензором напряжений Коши $\boldsymbol{\sigma}$, который удовлетворяет уравнению равновесия и разделяется на шаровую и девиаторную части:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0, \quad \boldsymbol{\sigma} = \sigma_m \mathbf{I} + \mathbf{s}, \quad (5)$$

где σ_m — среднее значение тензора напряжений, $\mathbf{s}$ — девиатор тензора напряжений.

В целях упрощения модели здесь используются геометрически линейные тензоры деформаций и напряжений. В момент времени $t = 0$ материальная точка имеет объём dV_0 , который при $t > 0$ становится равным dV . Обозначим вектор перемещения материальной точки через $\mathbf{u}$, тогда тензор малых полных деформаций имеет вид и также разделяется на шаровую и девиаторную части:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla), \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{3} \varepsilon_V \mathbf{I} + \mathbf{e}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_V = (dV - dV_0)/dV_0$ и $\mathbf{e}$ — объемная деформация и девиаторная часть тензора деформаций.

Материальная точка претерпевает объёмные деформации упругой ε_V^e и неупругой природы ε_V^s . Последние связаны с притоком (оттоком) компонентов в материальную точку либо с химическими превращениями и называются деформациями набухания. Для объёмных деформаций записывается аддитивное разложение

$$\varepsilon_V = \varepsilon_V^e + \varepsilon_V^s. \quad (7)$$

В работе [4] показывается, что при использовании условия молекулярной несжимаемости [5] с учетом малости деформаций имеет место соотношение

$$\varepsilon_V^e = 1 + \varepsilon_V - \sum_{k=1}^7 V_k c_k, \quad (8)$$

связывающее объёмные деформации с переменными химического состава. Далее удобно перейти к основным переменным состава с использованием соотношения $c_k = \rho_k/m_k = \rho x_k/m_k$.

Изменение формы элементарного объема материала описывается упругой $\mathbf{e}^e$ и пластической $\mathbf{e}^p$ девиаторными составляющими тензора малых деформаций,

связанными аддитивным разложением

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}^e + \mathbf{e}^p. \quad (9)$$

4. Физические уравнения. Физические соотношения модели строятся в рамках классической термодинамики необратимых процессов для многокомпонентных сред. Вывод уравнений приводится в работе [4]. Напряжения связываются с упругими деформациями с помощью закона Гука

$$\sigma_m = K\varepsilon_V^e, \quad \mathbf{s} = 2G\mathbf{e}^e. \quad (10)$$

Предполагается, что объёмный модуль K и модуль сдвига G для продуктов коррозии и металла отличаются незначительно, что делает их не зависящими от состава.

Принимается, что пластические деформации описываются законом пластического течения

$$\frac{d\mathbf{e}^p}{dt} = \frac{3\dot{\varepsilon}^p}{2\bar{\sigma}}\mathbf{s}, \quad \dot{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{d\mathbf{e}^p}{dt} : \frac{d\mathbf{e}^p}{dt}}, \quad (11)$$

ассоциированным с критерием текучести Мизеса

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y, \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}\mathbf{s} : \mathbf{s}}, \quad (12)$$

в котором учитывается изотропное деформационное упрочнение, описываемое законом

$$\sigma_Y = \sigma^0 + b(\bar{\varepsilon}^p)^n, \quad \bar{\varepsilon}^p = \int_0^t \dot{\varepsilon}^p dt, \quad (13)$$

В многокомпонентной среде константы закона упрочнения зависят от химического состава. Для констант σ^0 и b предлагается использовать модель смешения в форме

$$\sigma^0 = (1 - x_2 - x_3)\sigma_c^0 + (x_2 + x_3)\sigma_m^0, \quad b = (1 - x_2 - x_3)b_{cor} + (x_2 + x_3)b_m, \quad (14)$$

а показатель степени n оставить константой. Сумма массовых долей $x_2 + x_3$ в металле равняется единице, и величины σ^0 , b принимают значения, определяемые для металла σ_m^0 и b_m . Значения σ_c^0 и b_c задают пластические свойства коррозионного слоя.

Для построения кинетических уравнений диффузионных и химических процессов вводятся мольная $\xi_k = c_k/c$ (с учётом обозначения $c = \sum_{k=1}^7 c_k$) и объёмная $\phi_k = c_k V_k$ доли k -ого компонента. Для химических реакций принимается нелинейное кинетическое уравнение [6], в которое подставляются химические потенциалы из работы [4]

$$\dot{\ell}_i = k_i \prod_{j \in R_i} \xi_j \left(1 - \exp \left(A_i^0 - \sum_{k=1}^7 \nu_k^i V_k \frac{\sigma_m}{RT} \right) \prod_{k=1}^7 \xi_k^{\nu_k^i} \right), \quad i = 1, 2, 3 \quad (15)$$

где k_i — константа скорости i -ой химической реакции, A_i^0 — стандартное химическое сродство i -ой химической реакции, R — универсальная газовая постоянная, T — термодинамическая температура, $R_1 = \{1, 2\}$, $R_2 = \{1, 3\}$, $R_3 = \{3, 4\}$.

Нелинейная кинетика позволяет получить локализованный фронт химических реакций в среде с диффузией реагирующих компонентов без использования посторонних сущностей типа фазового поля или поверхностных градиентов напряжений.

Далее выводятся соотношения для независимых диффузионных потоков подвижных реагентов относительно локальной системы отсчета, связанной с маркерами

$$\mathbf{j}_k^m = -D_k \left(\frac{1}{\xi_k} \nabla \xi_k - \frac{x_k - \phi_k}{RT} \nabla \sigma_m \right), \quad k = 1, \dots, 4, \quad (16)$$

$$D_k = 0, \quad \mathbf{j}_k^m = 0, \quad k = 5, 6, 7$$

где D_k — коэффициент диффузии k -ой компоненты. Принимается, что продукты коррозии не диффундируют относительно маркеров. Используя связи диффузионных потоков (3) и переменных состава, получаем диффузионные потоки относительно материала

$$\mathbf{j}_k = -\frac{\rho D_k}{c} \nabla x_k + \frac{\rho x_k}{c} \sum_{i=1}^7 \left(D_i + \frac{\rho}{m_i c} \left(D_k - \sum_{j=1}^4 x_j D_j \right) \right) \nabla x_i$$

$$+ \frac{1}{RT} \left(x_k \sum_{j=1}^4 m_j (x_j - \phi_j) D_j - (x_k - \phi_k) m_k D_k \right) \nabla \sigma_m, \quad k = 1, \dots, 7. \quad (17)$$

с коэффициентами диффузии диффундирующих компонентов, построенными по модели смешения

$$D_k = D_k^{\text{FeCr}} + (D_k^{\text{Fe}_2\text{O}_3} - D_k^{\text{FeCr}}) x_5 + (D_k^{\text{Cr}_2\text{O}_3} - D_k^{\text{FeCr}}) x_6 + (D_k^{\text{Cr}_2\text{S}_3} - D_k^{\text{FeCr}}) x_7. \quad (18)$$

Если k -ая компонента диффундирует в оксиде железа, т.е. при $x_5 = 1$, коэффициент диффузии k -ой компоненты $D_k = D_k^{\text{Fe}_2\text{O}_3}$. Аналогичные соотношения получаются при $x_6 = 1$, $x_7 = 1$ либо отсутствии массовых долей продуктов коррозии.

5. Система уравнений. Связанная система уравнений процессов взаимной диффузии и деформирования с сопровождающими химическими реакциями состоит из уравнений: баланса переменных химического состава (4), равновесия (5), сплошности (6)–(9), упругопластичности (12)–(11), химической (15) и диффузионной (17), (18) кинетики.

Система дополняется начальными

$$\mathbf{v}|_{t=0} = 0, \quad x_2|_{t=0} = x_2^0, \quad x_3|_{t=0} = x_3^0, \quad x_k|_{t=0} = 0, \quad k \neq 2, 3,$$

и граничными условиями

$$\mathbf{v}|_{\Gamma_v} = 0, \quad \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}|_{\Gamma_\sigma} = 0,$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_k|_{\Gamma_j} = j_k(x_k), \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_k|_{\Gamma_0} = 0, \quad k = 1, \dots, 6,$$

где диффузионные потоки на границе определяются через коэффициенты проницаемости для диффундирующих компонентов d_k , $k = 1, \dots, 4$ и массовые доли

компонентов на границе $x_k^\Gamma \neq 0$, $k = 1, \dots, 4$ (для остальных компонентов $x_k^\Gamma = 0$) следующим образом

$$j_k = -\frac{\rho d_k}{c}(x_k - x_k^\Gamma) + \frac{\rho x_k}{c} \sum_{i=1}^7 \left(d_i + \frac{\rho}{m_i c} \left(d_k - \sum_{j=1}^4 x_j d_j \right) \right) (x_i - x_i^\Gamma).$$

Заключение. Предложена связанная модель процессов взаимной диффузии, упругопластического деформирования и химических реакций, адаптированная к описанию сульфидно-оксидной коррозии жаропрочной стали Fe₇₀Cr₃₀ при повышенных температурах. Модель базируется на наиболее простом механизме сульфидно-оксидной коррозии, в котором действуют четыре диффундирующих реагента (O₂, Fe, Cr, S₂) и три диффузионно-неподвижных продукта химических реакций (Fe₂O₃, Cr₂O₃, Cr₂S₃). Преимущество модели заключается в использовании маркерной скорости при описании диффузии, относительно которой диффузионные потоки являются независимыми, что не требует явного рассмотрения плотности вакансий либо каких-то других посторонних полей, модерирующих процесс взаимной диффузии. Окончательная система уравнений записывается для материальной точки с помощью соотношений связи диффузионных потоков относительно маркеров и материала. В связанной модели последовательно учитывается влияние напряжений на диффузию и химические реакции, а также формирование собственных деформаций и остаточных напряжений за счет диффузионных и химических процессов. Поэтому с ее помощью может быть теоретически исследованы процессы, происходящие в деталях горячих секций авиационного двигателя при действии постоянной или циклической химической, температурной и механической нагрузок, влияние на них остаточных напряжений, зависимость от химического состава сплава и агрессивной среды, темпы коррозионной стойкости и обеднения легирующими элементами приповерхностного слоя.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Д. С. Дудин — теоретическая часть, написание текста рукописи, И. Э. Келлер — критический анализ работы, редактирование текста рукописи.

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

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания по теме Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, № ГР АААА-А20-120022590044-7.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. D. S. Dudin — theoretical part, writing the text of the manuscript, I. E. Keller — critical analysis of the work, editing the text of the manuscript.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. This study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State Registration Numbers АААА-А20-120022590044-7.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] De Groot S. R., Mazur P. Non-equilibrium thermodynamics. Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1962. 528 с.
- [2] Ning Z., Zhou Q., Liu Z. Effects of imposed stresses on high temperature corrosion behavior of T91 // Corrosion Science. 2021. № 189. С. 109595. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109595.
- [3] Mehrer H. Diffusion in solids. Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes. 2007. 654 с.
- [4] Dudin D. S., Keller I. E. On the Decomposition of Motion in the Description of Interdiffusion in a Viscoelastic Body // Mechanics of Solids. 2024. № 7 (59). С. 3781–3797. DOI: 10.1134/S0025654424606013.
- [5] Brassart L., Liu Q., Suo Z. Mixing by shear, dilation, swap, and diffusion // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2018. № 112. С. 253–272. DOI: 10.1016/j.jmps.2017.12.008.
- [6] Freidin A. B. On the chemical affinity tensor for chemical reactions in deformable materials // Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State. 2015. № 3 (50). С. 260–285. DOI: 10.3103/S0025654415030048.

REFERENCES

- [1] De Groot S. R., Mazur P. Non-equilibrium thermodynamics. Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1962. 528 p.
- [2] Ning Z., Zhou Q., Liu Z. Effects of imposed stresses on high temperature corrosion behavior of T91 // Corrosion Science. 2021. no. 189. P. 109595. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109595.
- [3] Mehrer H. Diffusion in solids. Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes. 2007. 654 p.
- [4] Dudin D. S., Keller I. E. On the Decomposition of Motion in the Description of Interdiffusion in a Viscoelastic Body // Mechanics of Solids. 2024. no. 7 (59). P. 3781–3797. DOI: 10.1134/S0025654424606013.
- [5] Brassart L., Liu Q., Suo Z. Mixing by shear, dilation, swap, and diffusion // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2018. no. 112. P. 253–272. DOI: 10.1016/j.jmps.2017.12.008.
- [6] Freidin A. B. On the chemical affinity tensor for chemical reactions in deformable materials // Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State. 2015. no. 3 (50). P. 260–285. DOI: 10.3103/S0025654415030048.