

УДК 539.376

ОБ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДЛИТЕЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СТЕРЖНЯ, НАХОДЯЩЕГОСЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ*

Фомин Л.В., Басалов Ю.Г., Локощенко А.М.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Вопрос влияния коррозионных процессов на обеспечение безопасной эксплуатации материалов и элементов конструкций рассмотрен на базе постановки задачи о длительном разрушении растягиваемого стержня, находящегося в условии ползучести. Для решения задачи разработана механико-математическая модель, включающая модифицированное уравнение диффузии, кинетическое уравнение накопления повреждений и соотношение для параметра химического взаимодействия. Параметры указанной модели определены на базе экспериментальной зависимости толщины коррозионной пленки от времени. Рассматривается многостадийность процесса разрушения коррозионных слоев под действием увеличивающегося эффективного напряжения.

Ключевые слова: длительное разрушение; коррозионно-активная среда; модифицированное уравнение диффузии; кинетические параметры; параметр химического взаимодействия; поврежденность; концентрация; стержень

ON ACCOUNTING THE INFLUENCE OF CORROSION PROCESSES ON DELAYED FRACTURE OF A ROD UNDER CREEP CONDITION

Fomin L.V., Basalov Yu.G., Lokoshchenko A.M.

*Research Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia*

ABSTRACT

The question of the influence of corrosion processes on ensuring the safe operation of materials and structural elements is considered on the basis of the formulation of the problem of the long-term destruction of a tensile rod that is in a creep condition. To solve the problem, a mechanical-mathematical model has been developed, including a modified diffusion equation, a kinetic equation for the accumulation of damage, and a relationship for the chemical interaction parameter. The parameters of this model are determined on the basis of the experimental dependence of the thickness of the corrosion film on time. A multi-stage process of destruction of corrosion layers under the action of increasing effective stress is considered.

Keywords: delayed fracture; corrosion-active medium; modified diffusion equation; kinetic parameters; chemical interaction parameter; damage; concentration; rod

* Работа выполнена при поддержке и частичном финансировании гранта РФФИ №17-08-00210.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной эксплуатации материалов и элементов конструкций, подверженных влиянию коррозионно-активной среды, является важной и актуальной задачей для обеспечения безопасности и надежности ответственных конструкций на протяжении всего срока эксплуатации. Это влияние обусловлено как диффузионным проникновением, так и химическим взаимодействием агрессивной среды с материалом. Особое значение приобретает изучение таких процессов при высокотемпературном длительном деформировании металлов в условиях ползучести [1-6]. В связи с этим наукоемкие исследования высокотемпературной прочности материалов и конструкций, в том числе, находящихся в условиях воздействия агрессивных сред, достаточно актуальны.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЫ С МАТЕРИАЛОМ

В литературе на сегодняшний день встречается огромное количество и разнообразие моделей взаимодействия активной среды с материалами [3]. Ввиду сложности рассматриваемых явлений используется междисциплинарный научный подход, в результате которого существующие модели можно разделить на две большие группы: физико-химические модели и феноменологические модели. Исследования авторов, которые используют физико-химические модели, основываются на глубоком атомно-молекулярном изучении физико-химических процессов в материале при воздействии на него активной среды, в частности, учете ионных потоков (анионно-катионных процессов) и движения электронов, участвующих в коррозионных процессах. В результате детального исследования авторы осуществляют построение физико-химических моделей, которые связывают основные термодинамические и физико-химические параметры изучаемых процессов на более высоком, по сравнению с атомно-молекулярным, уровне. Таким образом, как результат, указанные модели устанавливают зависимость между параметрами окружающей среды (температурой, влажностью, химическим составом среды, продолжительностью воздействия и т.д.) и параметрами коррозионного процесса. Особенностью физико-химических моделей является их строгая индивидуальность. При переходе к другим маркам материала, с другими формами и размерами поперечных сечений элементов конструкций, иным параметрам коррозионной среды и т.д. одна и та же модель может дать существенно отличающиеся результаты.

Более перспективным авторы настоящей статьи считают использование фундаментального подхода, связанного с построением математических феноменологических моделей, основанных на определяющих и кинетических уравнениях и описывающих процессы деформирования и разрушения конструкций и процессы взаимодействия материала и конструкций с указанными средами. Идентификация этих моделей, то есть определение значений коэффициентов (материальных параметров) в этих уравнениях и подбор подходящих материальных функций основываются на обработке экспериментальных данных, в результате решения полученной совокупности уравнений проводится анализ поведения конструкций в различных условиях.

Для того, чтобы перейти к построению математических (феноменологических) моделей, необходимо выбрать феноменологические

параметры, изменение которых можно было бы наблюдать во время эксперимента, или структурные параметры – так называемые кинетические параметры процесса взаимодействия материала и проникающей в него среды. Введение кинетических параметров в модели позволяет провести описание реальных экспериментальных данных с помощью рассматриваемой математической модели при различных программах температурно-силового нагружения. К феноменологическим параметрам можно относить толщину слоя материала, который уже подвергнут деструктивному влиянию среды (например, коррозионный износ), а к кинетическим параметрам – также, по мнению ряда авторов, относят толщину слоя, параметр коррозионной поврежденности, концентрацию элементов агрессивной среды в металле и др.

Здесь необходимо отметить универсальность таких моделей и их применимость для инженерных расчетов.

2. МОДЕЛЬ КОРРОЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Когда диффузия сопровождается химическими реакциями, обычное уравнение одномерной диффузии может быть модифицировано для учета этого, и становится [7]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial S}{\partial t}, \quad D = \text{const}, \quad (1)$$

где $C = C(z, t)$ – концентрация вещества, проникшего в материал посредством физической диффузии, $S = S(z, t)$ – концентрация вещества, связанного химической реакцией, t – время, z – координата, D – коэффициент диффузии.

Концентрация S связана с концентрацией C с помощью параметра химического взаимодействия R , причем $S = RC$. В общем случае указанные характеристики являются функциями пространственных координат и времени, в случае рассматриваемого одномерного процесса $C = C(z, t)$, $R = R(z, t)$, $S = S(z, t)$. Подставляя S в (1), получим

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{(1+R)} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \quad C = C(z, t). \quad (2)$$

Если R мало, то физическая диффузия является преобладающим процессом. И наоборот, если R велико, то химическое взаимодействие является преобладающим процессом. Для определения параметра химического взаимодействия R проанализируем зависимость толщины δ коррозионной пленки от времени.

Примем гипотезу о том, что скорость изменения толщины коррозионной пленки пропорциональна скорости изменения концентрации вещества, связанного посредством химической реакции

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \gamma \frac{\partial S}{\partial t}, \quad S = RC, \quad (3)$$

где $\gamma = \text{const}$ – характерная константа процесса.

Таким образом, зная зависимость $\delta(t)$, можно определить соотношение для R .

В качестве примера рассмотрим зависимость толщины коррозионной пленки от времени, полученную в эксперименте сотрудниками ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург) и опубликованную в [8]. На рис.1 показана зависимость толщины оксидной пленки от длительности испытаний стали 10X15H9C3Б в среде жидкометаллического теплоносителя на основе свинца. Точками показаны экспериментальные данные, а штриховыми линиями – результат аппроксимации экспериментальных данных с помощью зависимости $\delta = A - B \exp(-\lambda t)$, где константы имеют значения $A = 78.00$ мм, $B = 77.27$ мм, $\lambda = 1.5 \cdot 10^{-4}$ час⁻¹.

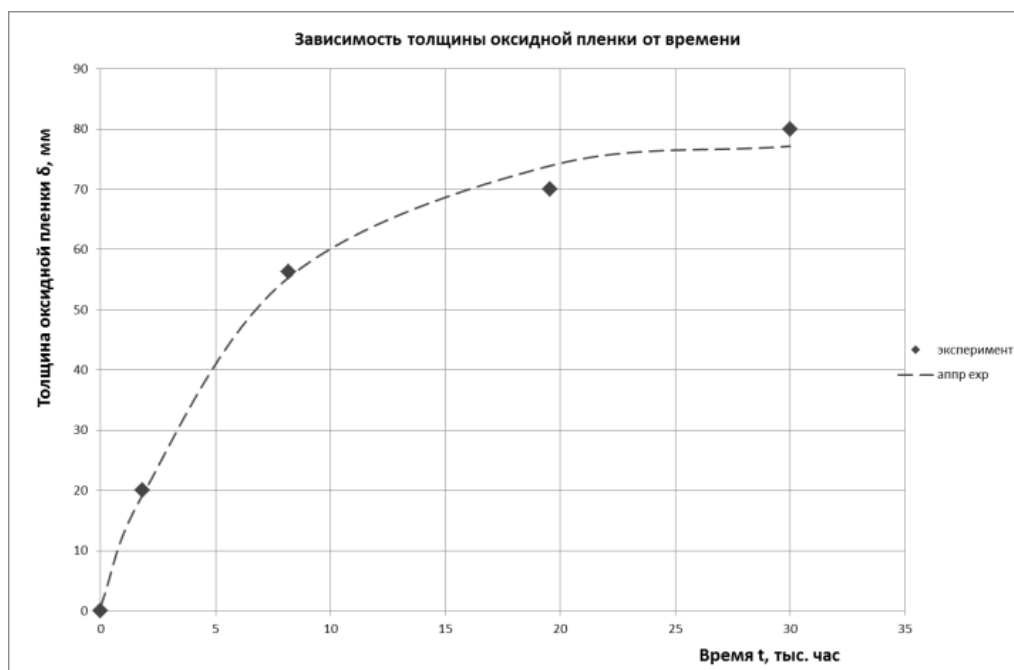


Рис.1. Зависимость толщины оксидной пленки от длительности испытаний стали 10X15H9C3Б.

В общем случае коррозионный слой может иметь место в начальный момент времени ($\delta(t_0 = 0) \neq 0$).

С учетом принятой аппроксимации для δ и гипотезы (3) выражение для параметра химического взаимодействия имеет следующий вид

$$R = \lambda B \exp(-\lambda t) \left[\gamma \frac{\partial C}{\partial t} \right]^{-1}. \quad (4)$$

3. СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДЛИТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Для решения поставленной задачи разработана система соотношений для моделирования влияния агрессивной коррозионно-активной среды на длительную прочность материалов и элементов конструкций [1-6]. Эта система уравнений включает в себя модифицированное уравнение диффузии [7], кинетическое уравнение накопления повреждений в процессе ползучести, учитывающее влияние агрессивной среды, и соотношение для параметра химического взаимодействия. Необходимо отметить, что выбранный закон накопления повреждений (второе уравнение системы (5)) учитывает влияние как диффузионного процесса, так и процесса коррозии на накопление повреждений.

Однако не исключено, что в дальнейшем анализе вид закона накопления повреждений может быть уточнен или модифицирован.

Система уравнений имеет следующий вид

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{(1+R)} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{B_1(\sigma)^n}{(1-\omega)^n} (1+aC(1+R)), \\ R = \lambda B \exp(-\lambda t) \left[\gamma \frac{\partial C}{\partial t} \right]^{-1}, \end{cases} \quad (5)$$

где σ – эффективное напряжение, $C = C(z, t)$ – концентрация вещества, проникшего в материал посредством физической диффузии, $\omega = \omega(z, t)$ – поврежденность, $R = R(z, t)$ – параметр химического взаимодействия, D – коэффициент диффузии, λ, B – константы, определяемые из экспериментальной зависимости [8] толщины коррозионной пленки от времени $\delta(t)$, γ – характерная константа коррозионного процесса, B_1, n – константы установившейся ползучести, a – материальная константа, определяемая из экспериментов по длительной прочности [4].

Далее в исследовании указанная система рассматривается в безразмерном виде.

4. МНОГОСТАДИЙНОСТЬ ПРОЦЕССА ДЛИТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕРЖНЯ

Далее в статье рассматривается постановка задачи о длительном разрушении растягиваемого стержня в условии ползучести с учетом диффузии и химического взаимодействия с агрессивной средой. Длинный стержень прямоугольного поперечного сечения толщиной H_0 и шириной b (причем $H_0 \ll b$) находится в коррозионно-активной среде, влияние которой характеризуется диффузионным проникновением ее элементов и коррозионным взаимодействием. Примем, что эти процессы описываются соотношением (1). Диффузия среды в материал рассматриваемого стержня характеризуется коэффициентом диффузии D , а образование коррозионного слоя происходит в соответствии с процессом, который описывается соотношениями (3) и (4). Поскольку $H_0 \ll b$ и характеристики среды одинаковы с обеих сторон стержня, рассматривается симметричный одномерный диффузионно-коррозионный процесс вдоль толщины стержня. Стержень находится под действием растягивающего напряжения в условии ползучести, в процессе которой накапливаются повреждения.

Предполагается многостадийный процесс разрушения, а именно, последовательное разрушение коррозионных слоев на поверхности, причем накопление повреждений происходит под действие увеличенного эффективного напряжения на рассматриваемой стадии процесса разрушения. Здесь вводится гипотеза об некотором инкубационном периоде времени, определяющем длительность каждой стадии коррозионного процесса, в течение которого происходит накопление повреждений. Критерием разрушения коррозионного

слоя на каждой стадии является достижение параметром ω значения, равного единице под действием эффективного напряжения.

Таким образом:

на первой стадии

$$0 < t \leq t_1^* \rightarrow \sigma = \sigma_{\text{эфф}_{-1}} = \sigma_0 \rightarrow \omega_1^* = \omega(t_1^*, \delta_{k1}) = 1.$$

на второй стадии

$$t_1^* < t \leq t_2^* \rightarrow \sigma = \sigma_{\text{эфф}_{-2}} = \frac{\sigma_{\text{эфф}_{-1}}}{(1 - 2\delta_{k1}/H_0)} \rightarrow \omega_2^* = \omega(t_2^*, \delta_{k2}) = 1.$$

здесь t_1^* и t_2^* – времена окончания первой и второй стадии процесса коррозионного разрушения соответственно, а δ_{k1} и δ_{k2} – соответствующие величины коррозионных слоев и т.д. до полного разрушения стержня.

Полное время до разрушения стержня t^{**} определяется на основе какого-либо из двух нижеперечисленных критериев:

- 1) Эффективное напряжение настолько сильно возрастет, что весь стержень полностью разрушится от кратковременной увеличенной нагрузки. Фактически это означает достижение эффективным напряжением предела кратковременной прочности $\sigma = \sigma_b|_{T=T_{\text{исп.}}}$ при рассматриваемой высокой температуре испытания $T = T_{\text{исп.}}$. При этом коррозионные процессы не успевают оказать влияние на разрушение на заключительной стадии. Таким образом, полное время до разрушения в этом случае t^{**} определяется критериальным подходом.
- 2) Накопление повреждений внутри всего стержня оказывает значительное влияние, и образец разрушится при достижении уровня поврежденности предельного значения $\omega^{**} = \omega(t^{**}) = 1$. Таким образом, полное время до разрушения t^{**} в этом случае определяется кинетическим подходом.

Введем безразмерные переменные

$$\begin{aligned} \bar{z} &= \frac{2z}{H_0}, \quad \bar{C} = \frac{C}{C_0}, \quad \bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_b}, \quad \bar{t} = t \cdot \frac{4D_0}{H_0^2}, \quad \bar{D} = \frac{D}{D_0}, \quad \bar{B}_1 = \frac{H_0^2 B_1 \sigma_b^n}{4D_0}, \\ \bar{a} &= aC_0, \quad \bar{\lambda} = \lambda \frac{H_0^2}{4D_0}, \quad \gamma_1 = \gamma \frac{4D_0 C_0}{H_0^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где C_0 – равновесная концентрация на поверхности, σ_b – предел кратковременной прочности, D_0 – коэффициент диффузии при комнатной температуре.

С учетом переменных (6) система уравнений (5) принимает следующий вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{t}} = \frac{\bar{D}}{(1+R)} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{z}^2}, \\ \frac{\partial \omega}{\partial \bar{t}} = \bar{B}_1 \frac{(\bar{\sigma})^n}{(1-\omega)^n} (1 + \bar{a}\bar{C}(1+R)), \\ R = \lambda B \exp(-\bar{\lambda}\bar{t}) \left[\gamma_1 \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{t}} \right]^{-1}. \end{cases} \quad (7)$$

Выберем систему координат следующим образом: $\bar{z} = 0$ – центр симметрии поперечного сечения стержня, $\bar{z} = 1$ – внешняя граница поперечного сечения стержня. Начальные и граничные условия имеют вид, зависящий от стадии процесса коррозионного разрушения.

1) На первой стадии процесса коррозионного разрушения при $0 < \bar{t} \leq \bar{t}_1^*$:

$\bar{C}(\bar{z}, 0) = 0$ – начальное условие,

$\bar{C}(1, \bar{t}) = 1$ – граничное условие на внешней боковой поверхности стержня.

Из условий симметрии диффузионного процесса относительно середины поперечного сечения стержня имеем

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}}(0, \bar{t}) = 0.$$

Принимаем нулевое распределение поврежденности в начальный момент времени

$$\omega(\bar{z}, 0) = 0.$$

Условие разрушения коррозионного слоя $\bar{\delta}_{k1}$ в момент времени окончания \bar{t}_1^* первой стадии

$$\omega_1^* = \omega(\bar{z} = 1 - \bar{\delta}_{k1}, \bar{t} = \bar{t}_1^*) = 1.$$

Граница коррозионного слоя $\bar{\delta}_{k1}$ определяется уравнением $\bar{S} = R\bar{C}$, характеризующим долю вещества, вступившего в химическое взаимодействие. Со стороны металла, не подверженного коррозии, концентрация вещества, связанного химической реакцией равна нулю: $\bar{S}(1 - \bar{\delta}_{k1}, \bar{t}) = 0$.

2) На второй стадии процесса коррозионного разрушения при $\bar{t}_1^* < \bar{t} \leq \bar{t}_2^*$:

$\bar{C}(\bar{z}, \bar{t}_1^*) = \bar{C}_1$ – распределение концентрации по координате \bar{z} , полученное в момент окончания первой стадии,

$\bar{C}(1 - \bar{\delta}_{k1}, \bar{t}) = 1$, $\bar{t} > \bar{t}_1^*$ – значение концентрации на новой внешней границе стержня, образованной в результате разрушения коррозионного слоя на первой стадии,

$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}}(0, \bar{t}) = 0$ – граничное условие в середине поперечного сечения стержня

(из условия симметрии диффузионно-коррозионного процесса),

$\omega(\bar{z}, \bar{t}_1^*) = \omega_1$ – распределение поврежденности по координате \bar{z} , полученное в момент времени \bar{t}_1^* окончания первой стадии коррозионного разрушения,

$\omega_2^* = \omega(\bar{z} = 1 - \bar{\delta}_{k1} - \bar{\delta}_{k2}, \bar{t} = \bar{t}_2^*) = 1$ – разрушение коррозионного слоя $\bar{\delta}_{k2}$ в момент времени \bar{t}_2^* окончания второй стадии,

$\bar{S}(1 - \bar{\delta}_{k1} - \bar{\delta}_{k2}, \bar{t}) = R(1 - \bar{\delta}_{k1} - \bar{\delta}_{k2}, \bar{t})\bar{C}(1 - \bar{\delta}_{k1} - \bar{\delta}_{k2}, \bar{t}) = 0$ – условие определения границы коррозионного слоя со стороны металла, не подверженного коррозии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На первом этапе численного расчета в безразмерном виде на первой стадии коррозионного процесса получены распределения безразмерных концентраций $\bar{C}(\bar{z}, \bar{t})$ и $S(\bar{z}, \bar{t})$ по поперечной координате \bar{z} стержня в характерные моменты времени \bar{t} .

Данное исследование имеет как фундаментальную направленность развития кинетической теории ползучести и длительной прочности Ю.Н. Работнова с учетом влияния агрессивной среды, так и прикладной характер. Это исследование может быть применено в проектировании композитных элементов конструкции, работающих в условиях воздействия агрессивных сред, например, в энергетическом и нефтехимическом машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. Локощенко А.М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. – М.: Физматлит, 2016. – 504 с.
3. Локощенко А.М., Фомин Л.В. *Моделирование поведения материалов и элементов конструкций, находящихся под воздействием агрессивных сред (обзор)* // Проблемы прочности и пластичности. – 2018. – Т.80. – №2. – С.145-179.
4. Фомин Л.В. *Описание длительной прочности растягиваемых стержней прямоугольного и круглого поперечных сечений в высокотемпературной воздушной среде* // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2013. – №3(32). – С.87-97.
5. Fomin L.V. *Steady-state creep of a composite rod in tension in the presence of an aggressive environment* // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Vol.52(6). – Pp.741-750.
6. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. *Delayed fracture of plates under creep condition in unsteady complex stress state in the presence of aggressive medium* // Applied Mathematical Modelling. – 2018. – Vol.60. – Pp.478-489.
7. Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. – Oxford: Clarendon Press, 1975. – 414 p.
8. Кудрявцев А.С., Марков В.Г., Лаврухин В.С. *Длительная прочность стали в жидкометаллическом теплоносителе на основе свинца* // Вопросы материаловедения. – 2006. – №4(48). – С.89-94.

REFERENCES

1. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest' ehlementov konstruksij [Creep of Structural Members]*. Moskva, Nauka, 1966, 752 p.
2. Lokoshchenko A.M. *Creep and Creep Rupture of Metals*. CISP. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca. Raton. London. New York, 2018, 546 p.
3. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. *Modelirovanie povedeniya materialov i ehlementov konstruksij, nakhodyashhikhsya pod vozdejstviem agressivnykh sred (obzor) [Modeling the behavior of materials and structural elements under the impact of aggressive environments]*. Problemy prochnosti i plastichnosti, 2018, Vol.80, No.2, Pp.145-179.
4. Fomin L.V. *Opisanie dlitel'noj prochnosti rastyagivaemykh stержnej*

- pryamougol'nogo i kruglogo poperechnykh sechenij v vysokotemperaturnoj vozduшной среде [Description of creep rupture strength of tensile rod with rectangular and circular cross section at high temperature air media]. Vestnik Samarskogo Gos. Tekh. Universiteta. Seriya Fiz.-Mat. Nauki, 2013, No.3(32), Pp.87-97.*
5. Fomin L.V. *Steady-state creep of a composite rod in tension in the presence of an aggressive environment. Mechanics of Composite Materials, 2017, Vol.52(6), Pp.741-750.*
 6. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. *Delayed fracture of plates under creep condition in unsteady complex stress state in the presence of aggressive medium. Applied Mathematical Modelling, 2018, Vol.60, Pp.478-489.*
 7. Crank J. *The Mathematics of Diffusion. Oxford, Clarendon Press, 1975, 414 p.*
 8. Kudryavtsev A.S., Markov V.G., Lavrukhin V.S. *Dlitel'naya prochnost' stali v zhidkometallicheskom teplonositele na osnove svintsa [Creep rupture strength of steel in a lead-based liquid metal coolant]. Voprosy materialovedeniya, 2006, No.4(48), Pp.89-94.*

Поступила в редакцию 07 сентября 2019 года.

Сведения об авторах:

Фомин Леонид Викторович – к.ф.-м.н., с.н.с., Лаборатория ползучести и длительной прочности НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: leonid1975@mail.ru

Басалов Юрий Генрихович – вед.инж., Лаборатория ползучести и длительной прочности НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: basalov@yandex.ru

Локощенко Александр Михайлович – д.ф.-м.н., проф., зав.лаб., Лаборатория ползучести и длительной прочности НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: loko@imec.msu.ru