

Памяти выдающегося советского ученого, академика Юрия Николаевича Работнова



Академик Юрий Николаевич Работнов (1914–1985), выдающийся ученый-механик, внес принципиальный вклад в развитие теории упругости и пластичности, теории оболочек и устойчивости упруго-вязкопластических систем, теории ползучести металлов и наследственной теории упругости, которые нашли применение при расчете и проектировании конструкций.

Он активно работал в новых направлениях механики разрушения, механики поврежденности и механики композиционных материалов. Трудно найти область механики деформируемого твердого тела, в которой Ю.Н. Работнов не получил бы яркие классические результаты. Его всегда отличали поразительное ощущение нового, умение блестяще сформулировать задачу и эффектно изложить полученные результаты. Высокая общая и математическая культура, широкая эрудиция, разумное сочетание тонкой теории и тщательной экспериментальной проверки привели к тому, что еще при жизни Юрий Николаевич по пра-

ву занял место в плеяде классиков механики. Подтверждением тому является нестареющий интерес к его идеям, результатам. Его книги неоднократно переиздавались, они есть почти у каждого ученого-механика и прочниста.

Творческая деятельность Ю.Н. Работнова в системе высшей школы и Академии наук позволяла ему привлекать к научным исследованиям своих университетских учеников, студентов и аспирантов Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Новосибирского государственного университета. За годы работы под его руководством многие ученые защитили кандидатские и докторские диссертации, получили поддержку в своей научной и педагогической карьере, заняли видное место в области механики деформируемого твердого тела и с гордостью могут причислить себя к научной школе Ю.Н. Работнова. К ним относятся члены РАН Б.Д. Аннин, С.А. Шестериков, Е.В. Ломакин. Ученики Ю.Н. Работнова работают в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Институте механики, Институте машиноведения РАН, Московском авиационном институте (техническом университете), Новосибирском государственном университете, Институте гидродинамики СО РАН, других учебных и научных организациях в России и за рубежом.

УДК 539.376; 539.42

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ*

А.М. Локощенко

Приведены основные экспериментальные и теоретические результаты по ползучести и длительной прочности металлов, полученные в Институте механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Эти результаты представляют собой развитие и обобщение кинетической теории ползучести и длительной прочности, разработанной выдающимся советским ученым академиком Юрием Николаевичем Работновым. Описаны основные особенности моделей ползучести металлов при постоянных и переменных напряжениях, при одноосном и сложном напряженных состояниях, при учете агрессивной среды и т.д.

Ключевые слова: кинетическая теория, ползучесть, длительная прочность, поврежденность, растяжение, виброползучесть, моделирование.

Введение

В этом году исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося советского ученого, академика Юрия Николаевича Работнова. Юрий Николаевич разработал несколько принципиально новых научных направлений. Особое место в этом ряду занимают его пионерские результаты в области ползучести и длительной прочности материалов.

В фундаментальной монографии [1] Ю.Н. Работнов подытожил результаты широкого круга

исследований, проводившихся во всем мире, и сформулировал теорию ползучести в форме концепции уравнения механического состояния. Согласно этой концепции скорость ползучести $\dot{\rho}$ структурно устойчивого материала зависит от величины приложенного напряжения σ , температуры T и структурного состояния материала в этот момент времени t :

$$\dot{\rho} = \dot{\rho}(\sigma, T, q_1, q_2, \dots, q_N). \quad (1)$$

Структурное состояние материала можно характеризовать набором величин $q_1, q_2, \dots, q_N$,

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-00570).

которые называются структурными параметрами. Структурные параметры q_i ($i = 1, 2, \dots, N$) в процессе деформирования изменяются во времени в соответствии с кинетическими уравнениями

$$dq_i = a_i dp + b_i d\sigma + c_i dt + g_i dT, \quad (2)$$

причем коэффициенты a_i, b_i, c_i, g_i – функции от p, σ, t, T , а также от параметров $q_1, q_2, \dots, q_N$. В качестве структурных параметров q_i можно рассматривать деформацию ползучести p , поврежденность ω , рассеянную работу, эффективную площадь сечения, уменьшающуюся вследствие растрескивания, размер магистральной трещины, плотность дислокаций, уменьшающуюся при растяжении, плотность материала и др. С помощью системы уравнений (1)–(2) можно описать различные наблюдаемые в экспериментах особенности ползучести и длительной прочности металлов.

В данной статье приведены некоторые экспериментально-теоретические результаты, полученные в этом направлении сотрудниками Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова. До 2002 года эти исследования проводились под руководством члена-корреспондента Российской академии наук Сергея Александровича Шестерикова, с 2003 г. по настоящее время – под руководством автора настоящей статьи.

Соотношения ползучести с учетом нескольких параметров состояния

Существующая методика введения ω в виде отношения $\sigma / (1 - \omega)$ приводит к тому, что в случае условного разделения кривой ползучести при постоянном напряжении на участки установившейся и ускоренной ползучести граница между ними строго определена. Было показано [2], что если в качестве эффективного напряжения вместо $\sigma / (1 - \omega)$ принять отношение $\sigma / (1 - \omega^r)$, где показатель степени $r > 0$ характеризует нелинейность влияния накопленной поврежденности на процесс ползучести, то это расширит возможности описания реально наблюдаемых кривых ползучести.

Большой интерес представляет гипотеза наличия двух кинетических параметров поврежденности ω_1 и ω_2 , для которых уравнения могут быть записаны в виде [3]

$$\dot{\omega}_1 = F_1(\sigma, T, \omega_1, \omega_2), \quad \dot{\omega}_2 = F_2(\sigma, T, \omega_1, \omega_2),$$

где F_1 и F_2 – функции указанных параметров.

Эти соотношения являются дополнением к уравнению механического состояния, которое в данном случае может быть представлено в виде

$$\dot{p} = \dot{p}(p, \sigma, T, \omega_1, \omega_2).$$

Подобно тому, как для одного параметра ω условием разрушения считается достижение этим параметром некоторого критического значения, которое можно принять за единицу, для случая двухпараметрической системы предельное состояние можно определить условием [3]

$$\max(\omega_1(t^*), \omega_2(t^*)) = 1,$$

где t^* – время до разрушения.

Такое представление процесса накопления повреждений позволяет описать ряд наблюдаемых в экспериментах явлений. Так, в случае, если кинетические уравнения записать в форме независимой простейшей системы

$$\dot{\omega}_1 = A_1 [\sigma / (1 - \omega_1)]^{n_1}, \quad \dot{\omega}_2 = A_2 [\sigma / (1 - \omega_2)]^{n_2}, \quad (3)$$

где A_1, A_2, n_1, n_2 – константы, легко показать, что кривая длительной прочности в логарифмических координатах имеет вид ломаной, при этом наклон отрезков определяется показателями n_1 и n_2 . Точка пересечения двух прямых определяет напряжение σ_0 , при котором одновременно ω_1 и ω_2 достигают за одно и то же время своего критического значения. В дальнейших работах были рассмотрены различные варианты обобщения соотношений: учет взаимного влияния параметров поврежденности ω_1 и ω_2 , мгновенной поврежденности при квазистатическом нагружении, видоизмененного критерия длительного разрушения и т.д. Показано, что с помощью различного введения двух параметров поврежденности можно описать наблюдаемые во многих испытаниях различные отклонения суммы парциальных времен S от единицы, при этом величина S изменяется в диапазоне от 0 до 2.

Немонотонная зависимость предельной деформации ползучести от напряжения

Характерной особенностью зависимостей $\dot{p}$ и $\dot{\omega}$ от напряжения σ является то, что эти зависимости обычно имеют вид степенных функций. В этом случае предельная деформация p^* , соответствующая разрушению, оказывается монотонной функцией от напряжения, однако

в ряде экспериментальных данных это условие нарушается. Было показано [4, 5], что моделирование немонотонной зависимости $\dot{p}^*(\sigma)$ возможно при использовании различных функциональных соотношений для учета влияния напряжения на скорость ползучести и на скорость накопления поврежденности. Если, например, рассмотреть степенную зависимость $\dot{p}$ от σ и экспоненциальную зависимость $\dot{\omega}$ от σ

$$\dot{p} = B \cdot \left(\frac{\sigma}{1 - \omega} \right)^n, \quad \dot{\omega} = C \cdot \frac{\text{sh}(\sigma / c)}{(1 - \omega)^n}, \quad (4)$$

где C и B – константы, то можно показать, что зависимость предельной деформации p^* от уровня напряжения σ имеет внутренний максимум. Видоизменением уравнений (4) можно легко добиться, что при промежуточном значении напряжения предельная деформация будет минимальна.

Существенно расширяется круг качественно новых эффектов, когда уравнение состояния и стандартное кинетическое уравнение заменяются соотношениями, учитывающими «мгновенную» поврежденность материала. В качестве простейшего варианта таких соотношений можно использовать уравнения, предложенные Бробергом:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= A s^m \dot{s} + B s^{m_2}, \\ \dot{\omega} &= C s^n \dot{s} + D s^{n_2}, \quad s = \sigma / (1 - \omega). \end{aligned} \quad (5)$$

Показано [6], что при определенных ограничениях, наложенных на показатели степени в (5), возможна немонотонная зависимость деформации при разрушении от напряжения в задаче длительной прочности.

Ресурс деформационной способности материала

В известных испытаниях, проводившихся при постоянной скорости логарифмической деформации $\dot{\varepsilon}_0$, получена немонотонная зависимость предельной логарифмической деформации ε^* от величины $\dot{\varepsilon}_0$ (с внутренним максимумом). Для моделирования полученных результатов испытаний было использовано кинетическое уравнение в следующей форме [7]:

$$\dot{\omega} = C \sqrt{\dot{\varepsilon}_0} \exp(\beta \dot{\varepsilon}_0^n), \quad \omega(t=0) = 0, \quad \omega(t=t^*) = 1.$$

В этом случае зависимость предельной деформации ε^* от скорости $\dot{\varepsilon}_0$ имеет внутренний максимум:

$$\varepsilon^* = \sqrt{\dot{\varepsilon}_0} [C \exp(\beta \dot{\varepsilon}_0^n)]^{-1}.$$

Дробно-степенная модель установившейся ползучести

Для модели установившейся ползучести $\dot{p}(\sigma)$ обычно принимают либо степенную зависимость от напряжения, либо экспоненциальную зависимость (типа гиперболического синуса). Соотношениями такого вида не удастся достаточно хорошо описать наблюдаемые в опытах зависимости параметров ползучести во всем диапазоне изменения напряжения.

Под руководством С.А. Шестерикова написан цикл статей ([8, 9] и др.), в которых предложен принципиально новый вид уравнения установившейся ползучести $\dot{p} = f(\sigma)$:

$$f(\sigma) = A \left(\frac{\sigma}{\sigma_b - \sigma} \right)^n. \quad (6)$$

Параметр σ_b соответствует напряжению, при котором имеет место неограниченный рост скорости деформации ползучести (условный предел прочности). Оказалось, что с точностью до наблюдаемого в экспериментах разброса с помощью соотношения (6) можно описать кривые ползучести при постоянной температуре T во всем диапазоне изменения напряжения. Это особенно важно потому, что Ю.Н. Работнов [1], используя степенную или экспоненциальную зависимости для описания кривых ползучести в широком диапазоне изменения σ , отмечал необходимость введения зависимости показателя степени или коэффициента в экспоненте от напряжения. Следует отметить, что соотношение при $n=1$ применимо также для низких уровней напряжений, поскольку во многих экспериментальных работах в этом диапазоне отмечается линейный характер зависимости скорости ползучести от напряжения.

При различающемся сопротивлении растяжению и сжатию в некоторых статьях применялись разные соотношения [9]:

$$\dot{p} = \frac{B \sigma \sigma_b}{(\sigma_b - \sigma)(\sigma - \sigma'_b)}, \quad \dot{p} = \frac{B \sigma}{\sqrt{(\sigma_b - \sigma)(\sigma - \sigma'_b)}}$$

($\sigma_b > 0$ и $\sigma'_b < 0$ – пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно).

Экспериментальные методы измерения поврежденности

В отличие от известных методов измерения поврежденности был предложен метод измерения структурных изменений в металле непо-

средственно в ходе высокотемпературной ползучести, без охлаждения и разгрузки образцов [10]. Для достижения этой цели проводилось измерение электрического сопротивления $R(t)$ цилиндрических образцов при одноосном растяжении, и эти данные сопоставлялись с результатами измерения длины $l(t)$ испытываемых образцов при тех же значениях времени t .

В Институте механики МГУ были проведены испытания медных образцов при 400°C при напряжениях 40–70 МПа [10]. При обработке результатов испытаний образцов рассматривались две меры деформации: обычная логарифмическая мера деформации ползучести $p(t)$, основанная на данных автоматической записи удлинения образца в процессе ползучести, и мера $p_R(t)$, в которой использованы результаты измерения электрического сопротивления образцов. Анализ кривых ползучести $p(t)$ и $p_R(t)$ показал, что при всех значениях номинального напряжения σ_0 зависимость $p_R(t)$ возрастает быстрее, чем $p(t)$. При достаточно высоких напряжениях (из рассматриваемого диапазона), когда ползучесть происходит в основном за счет сдвиговых деформаций, превышение деформации $p_R(t)$ над $p(t)$ относительно невелико. Различие этих кривых возрастает при меньших напряжениях, для которых характерны раннее развитие пор и трещин вдоль межзеренных границ, охрупчивание и последующее межзеренное разрушение.

Под поврежденностью $\omega(t)$ при измерении электрического сопротивления образцов понимается отношение приращения электросопротивления, вызываемого образованием пор и микротрещин, их накоплением и слиянием в процессе ползучести, к электросопротивлению ненагруженного образца при температуре T . Для исследования структуры испытанных образцов металлографическим способом проводилось их разрезание по осевому сечению с целью приготовления микрошлифов. Под поврежденностью Ω понимается отношение суммарной длины поперечных границ между зёрнами, занятых порами и микротрещинами, к длине всех поперечных границ между зёрнами. Зависимости времени до разрушения t^* и значений предельной поврежденности ω^* и Ω^* от номинального напряжения σ обнаруживают характерный для ряда металлов излом внутри рассматриваемого диапазона изменения напряжения σ_0 (при одном и том же значении $\sigma_0 = 56$ МПа). В рассматриваемом диапазоне

исследуемых напряжений можно выделить участки с преимущественным межзеренным разрушением (при относительно малых напряжениях $\sigma_0 = 40$ –56 МПа) и с преимущественным внутризёрненным разрушением (при относительно больших напряжениях $\sigma_0 = 56$ –70 МПа).

Эффект виброползучести

Под явлением виброползучести понимается резкое ускорение процесса ползучести в условиях, при которых к статическому напряжению добавляется циклическая составляющая малой амплитуды (не превышающая 1% от статического напряжения). В Институте механики МГУ были проведены испытания трубчатых образцов из алюминиевых сплавов Д16Т и АД1 при температурах от 20 до 200°C . Эти испытания показали, что добавление к постоянно растягивающему напряжению продольных вибраций на растяжение-сжатие не приводит к изменению кривой ползучести. При добавлении к постоянному растягивающему напряжению крутильных вибраций или при добавлении к постоянному касательному напряжению продольных вибраций наблюдается эффект виброползучести, характеризуемый увеличением скорости ползучести в несколько раз. Во всех случаях проявления эффекта виброползучести наблюдается его «насыщение»: данный эффект наиболее заметен на первых циклах приложения вибрационной составляющей напряжения. В [11] проведено моделирование полученных ранее экспериментальных результатов с помощью кинетической теории Ю.Н. Работнова. С этой целью использована модифицированная теория упрочнения.

Влияние агрессивной среды на ползучесть и длительную прочность металлов

В [12, 13] представлены разработанные методы моделирования высокотемпературного деформирования и длительного разрушения металлов при одновременном воздействии внешних механических нагрузок (в условиях одноосного или сложного напряжённых состояний и агрессивной окружающей среды). Предложено приближенное решение уравнения диффузии, которое основано на разделении рассматриваемого тела на невозмущенную и возмущенную части и на определении движения границы между этими частями. Показана высокая точность рассмотренного приближения.

Исследовано взаимодействие диффузионного фронта и фронта разрушения в процессе ползучести. С помощью учета нарастающего во времени поверхностного разрушающегося слоя качественно и количественно описаны масштабный эффект длительной прочности и другие особенности экспериментальных данных.

Предложена вероятностная модель ползучести и длительной прочности, при этом материал представляется состоящим из большого количества структурных элементов. Для описания явления длительной прочности вводится понятие вероятности разрушения отдельных элементов, на основе которого выводится кинетическое уравнение для плотности неразрушенных структурных элементов. Для частного случая нагружения цилиндрической оболочки рассмотрены условия возникновения и развития фронта разрушения. Вероятностная модель применена для описания ползучести и длительной прочности типовых элементов конструкций в агрессивных средах.

Влияние концентрации напряжения на длительную прочность

В Институте механики МГУ были изготовлены образцы для испытаний из одного стержня. Одна часть образцов (I серия) представляла собой цилиндры кругового сечения, другая часть (II серия) имела осесимметричные поперечные кольцевые выточки полукруглого сечения [14]. Сравнивалось время до разрушения t^* этих образцов при условии, что напряжения в минимальном сечении образцов II серии совпадают с напряжениями в образцах I серии. Результаты этого анализа показали, что концентраторы напряжений оказывают систематическое подкрепляющее влияние на время до разрушения t^* . Особенно заметен подкрепляющий эффект концентраторов при относительно малых напряжениях, при которых наличие выточки приводит к увеличению времени t^* более, чем в два раза.

Для объяснения этого эффекта используется гипотеза «слабого звена», основанная на учете микронеоднородности материала. При растяжении образца переменного сечения вероятность того, что самое слабое по структуре сечение имеет минимальную площадь, очень мала. В связи с этим разрушение образца с выточкой, происходящее в самом узком сечении (достаточно прочном в структурном отношении) или вблизи

него, должно наступать при большем времени, чем разрушение образца постоянного поперечного сечения, что и наблюдается в экспериментах.

Дополнительно к этому исследованию было проведено экспериментальное исследование влияния величины рабочей длины растягиваемых образцов на длительную прочность. Для этого из одного стержня были изготовлены цилиндрические образцы с одним и тем же диаметром 5 мм и различной длиной l_0 рабочей части ($l_0 = 10 - 100$ мм). Испытания этих образцов на длительную прочность при одних и тех же значениях температуры T и напряжения σ показали наличие явно монотонно убывающей зависимости времени разрушения t^* от величины l_0 (в рассматриваемом диапазоне изменения l_0 среднее значение времени t^* изменяется почти в два раза). Для объяснения полученного результата используется учет микронеоднородности структуры реальных образцов. С увеличением рабочей длины повышается вероятность появления в образце более слабых в структурном отношении сечений, поэтому более длинные образцы должны разрушаться быстрее. С помощью привлечения дополнительных данных по масштабному эффекту получено количественное подтверждение правильности предложенного объяснения подкрепляющего эффекта концентрации напряжений.

Длительная прочность при сложном напряженном состоянии

Очевидно, что при моделировании длительного разрушения в условиях сложного напряженного состояния наиболее простые соотношения имеют место при использовании скалярного параметра поврежденности. Однако дефекты, определяющие накопление повреждений, – полости, микропоры, микротрещины – ориентированы нагрузками, под действием которых эти дефекты возникают. Как известно, микротрещины обычно развиваются приблизительно перпендикулярно максимальному из главных напряжений. Увеличение этих микротрещин приводит к разрушению соединений зерен в поликристалле, и в результате происходит разрыв. Для описания такого типа разрушений недостаточно использовать скалярный параметр поврежденности.

Впервые экспериментально получена зависимость времени до разрушения при стационарном сложном напряженном состоянии от

программы кратковременного нагружения. Отмечено, что различные виды напряженного состояния при одинаковых значениях $\sigma_{\max}$ и σ_u могут приводить к различным значениям времени до разрушения t^* . Все эти и другие особенности результатов испытаний могут быть описаны с помощью кинетического уравнения для анизотропного материала с векторным параметром поврежденности [15, 16]:

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = F(\sigma_{\max}) \cdot \left(\frac{\bar{\sigma}_{\max}}{\sigma_{\max}} \right), \quad \bar{\omega}(t=0) = 0.$$

В некоторых работах рассматривается сочетание скалярного и векторного параметров поврежденности. Шестериков С.А. с соавторами [17] отметили, что в процессе ползучести при сложном напряженном состоянии фактически появляется анизотропия свойств накопленной поврежденности, и предложили модель с комбинацией скалярного и векторного подходов. Скалярный параметр может быть использован для моделирования поведения материалов, в которых развиваются сферические поры или максимальное главное напряжение значительно больше остальных главных напряжений; в случае развития трещиновидных дефектов описание длительного разрушения следует проводить с помощью векторного подхода.

Заключение

Приведены основные результаты исследований процессов ползучести и длительной прочности металлов, полученные сотрудниками Института механики МГУ, начиная с 1980 г. За это время проведено большое количество экспериментальных исследований характеристик металлов при одноосном и сложном напряженных состояниях, в том числе, при учете влияния агрессивной среды. Предложены новые методы измерения поврежденности металлов, изучены условия появления виброползучести, впервые найдена зависимость характеристик длительной прочности при плоском напряженном состоянии от программы кратковременного нагружения и т.д. При моделировании полученных экспериментальных результатов, как правило, используется обобщение кинетической теории ползучести и длительной прочности, разработанной Ю.Н. Работновым в середине XX века. При этом особое внимание уделяется анализу связи макроскопических деформационных характеристик с особенностями структурных изменений в металлах.

Список литературы

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // Ж. прикл. мех. и техн. физ. 1980. № 3. С. 155–159.
3. Локощенко А.М., Шестериков С.А. К проблеме оценки длительной прочности при ступенчатом изменении напряжения // Ж. прикл. мех. и техн. физ. 1982. № 2. С. 139–143.
4. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Модель длительной прочности с немонотонной зависимостью деформации при разрушении от напряжения // Ж. прикл. мех. и техн. физ. 1982. № 1. С. 160–163.
5. Локощенко А.М., Назаров В.В. Экспериментально-теоретическое исследование ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 при 600°C // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2008. № 7. С. 3–11.
6. Дачева М.Д., Локощенко А.М., Шестериков С.А. Модельное представление предельной деформации при ползучести // Ж. прикл. мех. и техн. физ. 1984. № 4. С. 139–142.
7. Веклич Н.А., Локощенко А.М., Веклич П.Н. Моделирование ресурса деформационной способности материала // Прикладная механика и техническая физика. 2007. № 5. С. 183–188.
8. Шестериков С.А., Юмашева М.А. Конкретизация уравнения состояния в теории ползучести // Изв. АН СССР. Мех. тверд. тела. 1984. № 1. С. 86–91.
9. Шестериков С.А., Лебедев С.Ю., Юмашева М.А. О длительной прочности // Пробл. мех. сплошной среды: Сб. научн. тр. / Ин-т автомат. и процессов упр. – ДВО РАН. Владивосток. 1996. С. 80–85.
10. Локощенко А.М. Новый метод измерения поврежденности металлов при ползучести // Известия РАН. Механика твердого тела. 2005. № 5. С. 108–122.
11. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность при переменных напряжениях // Труды междунар. конф. «Актуальные проблемы механики сплошной среды», посвященные 100-летию Н.Х. Арутюняна (08–12.10.2012, Цахкадзор, Армения), Изд-во ЕГУАС, Ереван. 2012. Том 1. С. 325–328.
12. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах. – М.: Издательство МГУ, 2000. 178 с.

13. Локощенко А.М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. – М.: МГИУ, 2007. 264 с.
14. Шестериков С.А., Локощенко А.М. Влияние концентрации напряжений на длительную прочность // Пробл. прочности. 1996. № 5. С. 39–43.
15. Локощенко А.М. Методы моделирования длительной прочности металлов при стационарном и нестационарном сложных напряженных состояниях // Упругость и неупругость. Материалы межд. научн. симп. по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 100-летию со дня рождения А.А. Ильюшина (20-21.01.2011, Москва). Изд-во МГУ. 2011. С. 389–393.
16. Локощенко А.М., Назаров В.В. Длительная прочность металлов при равноосном плоском напряженном состоянии // Прикладная механика и техническая физика. 2009. № 4. С. 150–157.
17. Дачева М.Д., Шестериков С.А. Юмашева М.А. Поврежденность при сложном нестационарном напряженном состоянии // Изв. РАН. Мех. тверд. тела. 1998. № 1. С. 44–47.

Материал поступил в редакцию 11.03.14

**ЛОКОЩЕНКО
Александр
Михайлович**

E-mail: loko@imec.msu.ru
Тел.: (495) 939-53-08

Доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии РСФСР, действительный член РАЕН, почетный профессор МГИУ. Заместитель директора НИИ механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Сфера научных интересов: механика деформируемого твердого тела, теория ползучести и длительной прочности металлов. Автор 4 монографий, 250 научных работ.