



ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ

*Международный
научно-технический журнал
Основан в июле 1969 г.*

№ 4 (382) — 2006 г.

Учредители: Национальная академия наук Украины
Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины
(Регистрационное свидетельство серия КВ № 129 от 07. 10. 1993 г.)

Издатель Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины

Редакционная коллегия:

В. Т. Трошенко (главный редактор), **Б. А. Грязнов**, **А. Л. Квитка**, **Б. И. Ковальчук**, **Л. В. Кравчук**, **А. Я. Красовский**, **В. В. Кривенюк**, **А. А. Лебедев**, **П. П. Лепихин**, **В. В. Матвеев**, **В. П. Науменко**, **Г. В. Степанов**, **В. А. Стрижало** (зам. главного редактора), **В. В. Харченко**, **В. К. Харченко** (зам. главного редактора), **А. П. Яковлев**

Редакционный совет:

С. Воденичаров (Болгария), **А. Карпинтери** (Италия), **С. Коцаньда** (Польша), **Дж. Д. Ландес** (США), **Э. Маха** (Польша), **Н. А. Махутов** (Россия), **К. Миллер** (Великобритания), **Н. Ф. Морозов** (Россия), **Ю. Мураками** (Япония), **Г. Плювинаж** (Франция), **Я. Поклуда** (Чехия), **Р. Сандер** (Индия), **С. Седмак** (Сербия и Черногория), **Л. Тот** (Венгрия), **Д. Франсуа** (Франция), **К. В. Фролов** (Россия)

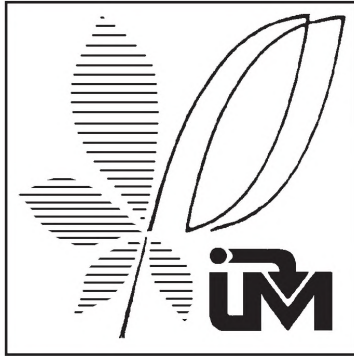
Редакция журнала «Проблемы прочности»:

А. О. Хоцяновский (отв. секретарь)
В. В. Науменко (зав. ред.-изд. отделом)
Л. Б. Дедух (вед. редактор)
Н. М. Шинкаренко (корректор)

*Адрес редакции: 01014, Киев-14, ул. Тимирязевская, 2
Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко
Национальной академии наук Украины*

*Телефон: (044) 286 5657
Факс: (044) 286 1684
E-mail: <editor@ipp.kiev.ua>*

*Журнал переводится на английский язык и издается в США с 1969 г. издательством
Kluwer Academic/Plenum Publishers под названием «Strength of Materials»*



PROBLEMS of STRENGTH

*International
scientific & technical journal
founded in July 1969*

No. 4 (382) — 2006

Founders: National Academy of Sciences of Ukraine
Pisarenko Institute of Problems of Strength, National Academy of Sciences
of Ukraine

Publisher: Pisarenko Institute of Problems of Strength, National Academy of Sciences
of Ukraine

Editorial board:

V. T. Troshchenko (editor-in-chief), B. A. Gryaznov, V. K. Kharchenko
(associate editor), V. V. Kharchenko, B. I. Koval'chuk, A. Ya. Krasovskii,
L. V. Kravchuk, V. V. Krivenyuk, A. L. Kvitka, A. A. Lebedev, P. P.
Lepikhin, V. V. Matveev, V. P. Naumenko, G. V. Stepanov, V. A. Strizhalo
(associate editor), A. P. Yakovlev

Advisory board:

A. Carpinteri (Italy), D. Francois (France), K. V. Frolov (Russia),
S. Kocanda (Poland), J. D. Landes (USA), E. Macha (Poland),
N. A. Makhutov (Russia), K. Miller (UK), N. F. Morozov (Russia),
Y. Murakami (Japan), G. Pluinage (France), J. Pokluda (Czech
Republic), S. Sedmak (Serbia and Montenegro), R. Sunder (India),
L. Toth (Hungary), S. Vodenicharov (Bulgaria)

Editorial staff:

A. O. Khotsyanovskii, V. V. Naumenko,
L. B. Dedukh, N. M. Shinkarenko

*Address: Pisarenko Institute of Problems of Strength
2, Timiryazevskaya str., Kiev, 01014, Ukraine*

*Telephone: (044) 286 5657
Fax: (044) 286 1684
E-mail: <editor@ipp.kiev.ua>*

*Since 1969 the Journal has been translated into English and published in the USA
by Kluwer Academic/Plenum Publishers under the title **Strength of Materials***

© Pisarenko Institute of Problems of Strength, National Academy of Sciences of Ukraine, 2006

Содержание

Предисловие	5
Научно-технический раздел	
ТРОЩЕНКО В. Т., КУРИАТ Р. И. Прочность материалов и конструкций (К 40-летию создания Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины)	7
ЛЕБЕДЕВ А. А., МИХАЛЕВИЧ В. М. Критериальные соотношения для определения остаточного ресурса материалов	31
ЛАНДЕС Дж. Д., ДОНОСО Х. Р. Обзор новых форматов параметров механики разрушения (на англ. яз.)	39
КАРЗОВ Г. П., ТИМОФЕЕВ Б. Т., ЧЕРНАЕНКО Т. А. Анализ случаев повреждений трубопроводов из аустенитной стали в атомной энергетике	46
ЖИЛЮКАС А. Двухпараметрический критерий разрушения (на англ. яз.)	56
ПЕЧИНКА Л., МОРАВКА С. Технический контроль при эксплуатации толстостенных бетонных конструкций (на англ. яз.)	64
КРАВЧУК Л. В., КУРИАТ Р. И., БУЙСКИХ К. П., ЗАДВОРНЫЙ Е. А., КИСЕЛЕВСКАЯ С. Г. Исследование кинетики повреждения жаропрочных сплавов при термодинамическом нагружении в газовом потоке	79
БАЖЕНОВ В. А., ГУЛЯР А. И., ПИСКУНОВ С. О., ШКРЫЛЬ А. А. Определение ресурса лопатки газовой турбины в условиях ползучести на основе континуальной механики разрушения	87
БАСОВ В. Н., НЕСТЕРЕНКО Б. Г., НЕСТЕРЕНКО Г. И., ПЕТРУСЕНКО В. Г. Исследование деградации свойств материалов при эксплуатации самолетов	94
КУКСА Л. В., АРЗАМАСКОВА Л. М., ЕВДОКИМОВ Е. Е., СЕРГЕЕВ А. В. Разработка методов расчета элементов конструкций из структурно-неоднородных материалов на основе построения физико-механических моделей	102
АДИБ Р., ШМИТТ С., ПЛЮВИНАЖ Г. Применение метода объемных измерений для оценки повреждений, вызванных воздействием инородных тел на газовые трубы (на англ. яз.)	109
ЛАГОДА Т. Долговечность сварных соединений согласно энергетическому критерию в критической плоскости (на англ. яз.)	118
ГУДРАМОВИЧ В. С., ДЕМЕНКОВ А. Ф., ЕГОРОВ Е. А., РЕПРИНЦЕВ А. В. О влиянии технологии изготовления на несущую способность стальных резервуаров	125
ИГНАТОВИЧ С. Р., ЗАКИЕВ И. М., БОРИСОВ Д. И., ЗАКИЕВ В. И. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами наноиндентирования и наносклерометрии	132
АУЗИНЫШ Я. П., БОЙКО А. Ф. Анализ чувствительности вибрационного метода структурной идентификации (на англ. яз.)	140
ЖЕЛДУБОВСКИЙ А. В., ПОГРЕБНЯК А. Д., РЕГУЛЬСКИЙ М. Н. Расчет предельного состояния алюминиевых сплавов при асимметричном циклическом растяжении-сжатии	148
Информация, реклама	
Международная конференция “Проектирование, производство и оптимизация сварных конструкций” (DFE2008)	156

Утвержден к печати ученым советом ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины.

*Номер подготовлен, набран и сверстан в редакции ИПП НАН Украины.
Отпечатан в типографии Издательского дома “Академперіодика”,
ул. Терещенковская 4, 01004, Киев-4. Заказ № 1683.*

Подп. к печати и в свет 19. 07. 2006. Тираж 500 экз. Цена договорная.

Contents

Preface	5
Scientific and Technical Section	
TROSHCHENKO V. T. and KURIAT R. I. Strength of Materials and Structures (On the 40th Anniversary of Foundation of the G. S. Pisarenko Institute of Strength of Materials)	7
LEBEDEV A. A. and MIKHALEVICH V. M. The Critical Equations for Residual Life Estimation of Materials	31
LANDES J. D. and DONOSO J. R. Review of New Formats for Fracture Mechanics Parameters	39
KARZOV G. P., TIMOFEEV B. T., and CHERNAENKO T. A. The Analysis of the Damage Events of Austenite Steel Pipelines in Nuclear Power Industry	46
ZILIUKAS A. Two-Parametrical Fracture Criterion	56
PECINKA L. and MORAVKA S. In-Service Inspections of Thick Walled Concrete Structures	64
KRAVCHUK L. V., KURIAT R. I., BUISKIKH K. P., ZADVORNYI E. A., and KISELEV-SKAYA S. G. Study of Damage Kinetics of Heat-Resistant Alloys Subjected to Thermocyclic Loading in a Gas Flow	79
BAZHENOV V. A., GULYAR A. I., PISKUNOV S. O., and SHKRYL' A. A. Evaluation of Gas Turbine Blade Life under Creep Conditions within Framework of the Continual Fracture Mechanics	87
BASOV V. N., NESTERENKO B. G., NESTERENKO G. I., and PETRUSENKO V. G. Study of Deterioration of the Material Properties in Aircraft Operation	94
KUKSA L. V., ARZAMASKOVA L. M., EVDOKIMOV E. E., and SERGEEV A. V. Elaboration of Calculation Techniques for Structural Components from Structurally Heterogeneous Materials on the Base of Physical-Mechanical Models	102
ADIB R., SCHMITT C., and PLUVINAGE G. Application of Volumetric Method to the Assessment of Damage Induced by Action of Foreign Object on Gas Pipes	109
LAGODA T. Fatigue Life of Welded Joints According to Energy Criteria in the Critical Plane	118
GUDRAMOVICH V. S., DEMENKOV A. F., EGOROV E. A., and REPRINTSEV A. V. On the Manufacturing Technology Effect on the Bearing Capacity of Steel Vessels	125
IGNATOVICH S. R., ZAKIEV I. M., BORISOV D. I., and ZAKIEV V. I. Material Surface Layer Damage Estimation for Cyclic Loading Conditions Using the Nanoidenting and Nanoscratching Techniques	132
AUZINS J. P. and BOYKO A. F. Analysis of the Sensitivity of a Vibration-Based Procedure for Structural Identification	140
ZHELDUBOVSKII A. V., POGREBNYAK A. D., and REGUL'SKII M. N. Critical State Calculation for Aluminum Alloys under Asymmetric Tension-Compression Cycling Conditions	148
Information, Commercial	
International Conference "Design, Fabrication and Economy of Welded Structures (DFE2008)"	156

Предисловие

12 ноября 2005 года исполнилось 95 лет со дня рождения выдающегося ученого и организатора науки, основателя Института проблем прочности Национальной академии наук Украины академика НАН Украины Георгия Степановича Писаренко.

В ознаменование этой даты 1–4 ноября 2005 года в Киеве в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины была проведена Международная научно-техническая конференция “Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций”.

В конференции приняли участие более 200 специалистов из 16 стран мира, в том числе из Украины, России, Беларуси, США, Великобритании, Германии, Франции, Индии, Польши, Чехии и др.

Научная тематика конференции соответствовала тем направлениям, которые развивал Г. С. Писаренко в институте, 40-летие которого будет отмечаться в сентябре 2006 г.

Основной период научной деятельности Г. С. Писаренко пришелся на вторую половину XX столетия. Это время характеризовалось бурным развитием новой техники, в первую очередь в тех отраслях промышленности, которые обеспечивали обороноспособность страны: ракетно-космической; авиационной; газотурбостроения; атомной энергетике и т.п. Перед учеными, в том числе и механиками, к которым относился Г. С. Писаренко, была поставлена задача организации научно-технического сопровождения при разработке, создании и освоении новой техники.

Прогресс в развитии современной техники обеспечивался в значительной степени благодаря созданию новых материалов, способных эксплуатироваться в экстремальных условиях: высокие и низкие температуры; воздействия высокотемпературных газовых потоков, нейтронного облучения; нестационарные тепловые и силовые воздействия большой интенсивности; высокие скорости нагружения и т.п.

Чрезвычайно важным, наряду с созданием этих материалов и исследованием их физико-механических свойств в различных условиях, была разработка критериев предельного состояния с учетом всего многообразия факторов, воздействующих на них при эксплуатации новой техники. Эти критерии являются основой как для создания материалов с требуемыми характеристиками, так и для разработки методов расчета на прочность высоконапряженных конструкций.

В своем творчестве Г. С. Писаренко значительное внимание уделял методам снижения динамической напряженности конструкций на основе рационального использования различных видов демпфирования колебаний.

Все эти вопросы нашли отражение в докладах, представленных на конференции. Всего было заслушано более 170 докладов.

В соответствии с решением Программного комитета доклады конференции публикуются в четвертом номере журнала «Проблемы прочности» за 2006 год и в 26, 27 выпусках сборника «Надежность и долговечность машин и сооружений» за 2006 год. В сборниках, как это следует из тематики

конференции, статьи систематизированы по разделам: динамика; прочность; ресурс машин и конструкций.

Программный комитет считает, что издание докладов конференции будет данью памяти Г. С. Писаренко, 95-летию которого посвящена эта конференция, а также будет способствовать обмену научными результатами по теме конференции между специалистами разных стран и научных коллективов и решению конкретных задач по созданию и надежной эксплуатации техники различного назначения.

Учитывая большое количество докладов, включенных в научно-технический сборник «Надежность и долговечность машин и сооружений», по просьбе Программного комитета для работы в редакционной коллегии были приглашены сотрудники Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины А. П. Зиньковский, А. Я. Красовский, А. А. Лебедев, П. П. Лепихин, Л. Е. Матохнюк, В. А. Стрижало. Программный комитет благодарит редакционные коллегии журнала и сборника за плодотворную работу.

Главный редактор,
Председатель Программного
комитета конференции
академик НАН Украины
В. Т. Троценко

Критериальные соотношения для определения остаточного ресурса материалов

А. А. Лебедев^а, В. М. Михалевич^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина

Представлены результаты, позволяющие создать алгоритм определения остаточного ресурса в рамках тензорного подхода к описанию поврежденности материалов при неупругом деформировании. Получены явные конечные критериальные зависимости для определения остаточного ресурса, обобщающие известные соотношения на более широкий случай процессов нагружения.

Ключевые слова: остаточный ресурс, тензор, повреждение, нагружение.

Целью настоящей работы является получение, в рамках тензорного описания поврежденности [1, 2], критериальных соотношений, позволяющих определить остаточный ресурс работы материалов при известной предыстории нагружения.

Для моделирования разрушения в условиях пластического деформирования, ползучести и других процессов используется математический аппарат, развитый в [1]. При известных исходных свойствах материала (они будут уточнены на конкретных примерах) и истории нагружения компоненты девиатора повреждений ψ_{ij} для данного текущего состояния q_d , согласно принятым допущениям [1, 2], можно представить в виде

$$\psi_{ij}(q_d) = \int_0^{q_d} f(q; \eta_i) \eta_{ij}(q) dq; \quad (1)$$

$$h_{ij}(q) = a\beta_{ij}(q) + b \left[\beta_{ik}(q)\beta_{kj}(q) - \frac{1}{3}\delta_{ij} \right], \quad (2)$$

где β_{ij} – направляющий тензор приращений деформаций или напряжений; q – параметр нагружения (деформация или время); a , b – коэффициенты тензорной нелинейности [1, 2]; δ_{ij} – единичный тензор Кронеккера; η_i – совокупность аргументов, характеризующих напряженно-деформированное состояние и свойства материала.

Поставленная задача состоит в том, чтобы определить остаточный ресурс материала. (Что именно подразумевается под остаточным ресурсом будет конкретизировано в каждом отдельном случае.)

В общем случае компоненты остаточного девиатора повреждений можно определить согласно (1)

$$\Delta\psi_{ij}^* = \Delta\psi_{ij}(q^*) = \int_{q_d}^{q^*} f(q; \eta_i) h_{ij}(q) dq, \quad (3)$$

где q^* соответствует моменту исчерпания остаточного ресурса и определяется из условия [1, 2]

$$\psi_u + 2\psi_{ij}\Delta\psi_{ij}^* + \Delta\psi_u^* = 1, \quad (4)$$

где

$$\psi_u = \psi_{ij}\psi_{ij}, \quad \Delta\psi_u^* = \Delta\psi_{ij}^*\Delta\psi_{ij}^*.$$

Применительно к пластическому деформированию соотношение (1) можно представить в виде [1]

$$\psi_{ij}(E_u^{\pi}) = \int_0^{E_u^{\pi}} \frac{n}{E_{*c}(\eta(E_u))} \left(\frac{E_u}{E_{*c}(\eta(E_u))} \right)^{n-1} h_{ij}(E_u) dE_u, \quad (5)$$

где E_u^{π} – накопленная пластическая деформация; $E_{*c}(\eta)$ – диаграмма пластичности; η – показатель напряженного состояния [3]; h_{ij} – тензор, определяемый направляющим тензором приращений деформаций β_{ij} и коэффициентом тензорной нелинейности b [1] (при $b = 0$ имеем тензорно-линейную модель, для которой $h_{ij} = \beta_{ij}$); n – экспериментально определяемый параметр.

Далее займемся определением остаточного ресурса для любого вида простого деформирования ($\beta_{ij} = \beta_{ij}^{(0)} = \text{const}$, $\eta = \eta_0 = \text{const}$). Для этого случая согласно (3)–(5) получим

$$\Delta\psi_* = \left[\left(\frac{E_u^{(\pi)}}{E_{*o}} \right)^n - \psi_{ij}(E_u^{(\pi)}) h_{ij}^{(0)} + \sqrt{(\psi_{ij}(E_u^{(\pi)}) h_{ij}^{(0)})^2 - \psi_u(E_u^{(\pi)}) + 1} \right]^{1/n} - \frac{E_u^{(\pi)}}{E_{*o}}, \quad (6)$$

где $\Delta\psi_* = \Delta E_*^{(o)} / E_{*o}$ – остаточный ресурс; $E_{*o} = E_{*c}(\eta_0)$; $\Delta E_*^{(o)}$ – остаточная пластическая деформация до разрушения.

Рассматривая некоторые частные случаи процессов деформирования до момента достижения девиатором повреждений величины $\psi_{ij}(E_u^{(\pi)})$ будем получать из соотношения (7) соответствующие критериальные зависимости, известные ранее [1].

Так, для многоэтапного деформирования, состоящего из ряда последовательных конечных этапов, в пределах которых деформация является простой, имеем

$$\psi_u(E_u^{(n)}) = \sum_{m=1}^{n-1} \left\{ 2h_{ij}^{(m)} F_m \left[\sum_{l=m}^{n-1} h_{ij}^{(l)} F_l \right] - F_m^2 \right\}; \quad (7)$$

$$\psi_{ij}(E_u^{(n)}) h_{ij}^{(0)} = h_{ij}^{(n)} \sum_{m=1}^{n-1} h_{ij}^{(m)} F_m; \quad (8)$$

$$F_m = \left(\sum_{k=1}^m \psi_k \alpha_{km} \right)^n - \left(\sum_{k=1}^{m-1} \psi_k \alpha_{km} \right)^n; \quad (9)$$

$$\psi_k = \frac{E_u^{(k)} - E_u^{(k-1)}}{E_{*k}}, \quad \alpha_{km} = \frac{E_{*c}(\eta^{(k)})}{E_{*c}(\eta^{(m)})}, \quad \Delta\psi = \Delta\psi_{*n}. \quad (10)$$

Получение явных расчетных зависимостей для частных случаев многоэтапного деформирования – работа достаточно трудоемкая. Для ее облегчения была составлена процедура в среде пакета символьной математики Maple, которая практически полностью автоматизирует процесс определения указанных зависимостей и выполнение соответствующих расчетов.

Применительно к двухэтапному деформированию, когда на первом этапе при $0 \leq E_u \leq E_u^{(1)}$ справедливо $\beta_{ij}(E_u) = \beta_{ij}^{(1)}$, $\eta(E_u) = \eta^{(1)}$, а на втором, при $E_u^{(1)} < E_u < E_*$ – $\beta_{ij}(E_u) = \beta_{ij}^{(2)}$, $\eta(E_u) = \eta^{(2)}$, соотношение (6), с учетом (7)–(10), преобразуется к виду

$$\psi_{*2} = \left[(\psi_1 \alpha_{12})^{n_2} - \psi_1^{n_1} I_{12} + \sqrt{\psi_1^{2n_1} (I_{12}^2 - 1) + 1} \right]^{1/n_2} - \psi_1 \alpha_{12}. \quad (11)$$

Здесь $\psi_1 = E_u^{(1)} / E_*(\eta^{(1)})$ – использованный ресурс пластичности на первом этапе; $\psi_{*2} = (E_* - E_u^{(1)}) / E_{*c}(\eta^{(2)})$ – остаточный ресурс пластичности на втором этапе; E_* – накопленная пластическая деформация до разрушения при данном нестационарном процессе; $\alpha_{12} = E_*(\eta^{(1)}) / E_*(\eta^{(2)})$; I_{12} – инвариантный параметр, который определяется направляющими тензорами $\beta_{ij}^{(1)}$ и $\beta_{ij}^{(2)}$, а также коэффициентом b ; параметры модели n_1 и n_2 вычисляются по результатам экспериментов при двухэтапном деформировании.

Применительно к трехэтапному деформированию получим

$$\psi_{*3} = [KI_{32} - \psi_1^n I_{31} + \sqrt{K_1 + K_2^n}]^{1/n} - K_2, \quad (12)$$

где

$$K = (\psi_1 \alpha_{12} + \psi_2)^n - (\psi_1 \alpha_{12})^n; \quad (13)$$

$$K_1 = \psi_1^{2n} (I_{31}^2 - 1) + 2\psi_1^n I_{31} I_{32} K + (KI_{32})^2 + 1 - K^2 - 2\psi_1^n KI_{12}; \quad (14)$$

$$K_2 = \psi_1 \alpha_{13} + \psi_2 \alpha_{23}. \quad (15)$$

Рассмотрим частный случай трехэтапного деформирования призматического тела, когда на всех трех этапах выполняется сжатие, причем на первом и третьем – осевое, а на втором – поперечное. Для данного случая справедливо

$$\alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{23} = 1, \quad I_{31} = 1, \quad I_{12} = I_{32} = -0,5 \quad (16)$$

и соотношение (12) существенно упрощается

$$\begin{aligned} \psi_{*3} = & [-1,5\psi_1^n + 1,5(\psi_1 + \psi_2)^n + \\ & + \sqrt{1 - 0,75[(\psi_1 + \psi_2)^n - \psi_1^n]^2}]^{1/n} - \psi_1 - \psi_2. \end{aligned} \quad (17)$$

На рис. 1 приведены расчетные зависимости остаточного ресурса пластичности на третьем этапе ψ_{*3} в зависимости от использованного ресурса пластичности на втором ψ_2 этапе. Каждая кривая соответствует определенному значению использованного ресурса пластичности на первом этапе ψ_1 . Исключением есть крайняя справа кривая, представляющая собой зависимость остаточного ресурса пластичности на третьем этапе ψ_{*3} от использованного ресурса пластичности на первом этапе ψ_1 при условии полного исчерпания ресурса пластичности на втором этапе ($\psi_2 = \psi_{*2}$). Следует заметить, что, согласно представленной тензорной модели, материал, исчерпавший ресурс пластичности при данных условиях деформирования, может воспринимать дальнейшую пластическую деформацию – при изменении направлений главных приращений деформаций. Иными словами речь идет об одном из следствий деформационной анизотропии предельных деформаций. А именно – предельная деформация для данного вида деформации неодинакова в разных направлениях. Важно, что в рамках рассматриваемой модели деформационная анизотропия предельных деформаций описывается отдельно для каждого простого деформирования, характеризуемого совокупностью показателей η_i .

Толстая линия на рис. 1 соответствует значению $\psi_1 = 0$ и является, фактически, зависимостью остаточного ресурса пластичности на сжатие в поперечном направлении в зависимости от использованного ресурса пластичности на сжатие в осевом направлении. Экспериментальные данные (○ – 9ХС, □ – Р6М5 [4]), на основании которых подобрано значение $n = 1,3$, относятся именно к этому случаю.

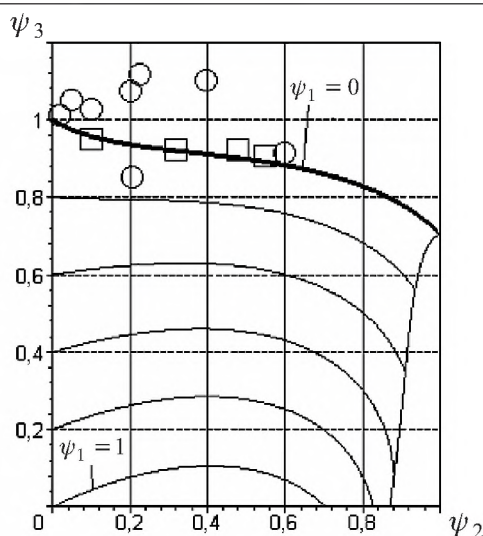


Рис. 1. Остаточный ресурс пластичности при трехэтапном сжатии.

Анализ данных рис. 1, показывает, что при изменении ψ_1 в пределах 0...0,6 использование ресурса пластичности на втором этапе в тех же пределах практически не влияет на остаточный ресурс. Более того, при $\psi_1 > 0,5$ становится ярко выраженным эффект восстановления пластичности в осевом направлении после некоторой степени деформации в поперечном направлении. Данный эффект можно объяснить частичным залечиванием накопленных микрповреждений в материала при изменении направления деформирования.

Важной является задача определения остаточной пластичности после воздействия на материал определенного числа циклов деформирования. В [1] приведены соотношения между числом циклов деформирования до разрушения и амплитудой пластической деформации для достаточно общего случая, когда под циклом понимается произвольная комбинация двухэтапного деформирования. С использованием в представлении (5) вместо степенной – квадратичной аппроксимации, для частного случая циклического деформирования – знакопеременного кручения, получена зависимость остаточного ресурса пластичности на кручение от числа циклов N предварительного деформирования с амплитудой Δ

$$\psi_{*n} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{c} - 1\right) - 2N\Delta + \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{1}{c} - 1\right)^2 + \left(\frac{1}{c} - 1\right)2N\Delta + 4N^2\Delta^2 + 2N\Delta^2 + \frac{1}{c}}. \quad (18)$$

Здесь c – параметр квадратичной аппроксимации, $0 < c \leq 1$. Полученное соотношение находится в хорошем качественном и удовлетворительном количественном соответствии с экспериментальными данными работы [5].

Применительно к процессам ползучести соотношение (1) можно записать в виде [1, 2]

$$\psi_{ij}(t^{(Л)}) = \int_0^{t^{(Л)}} \frac{m \exp[-m(t^{(Л)} - \tau)]}{1 - \exp\{-mt_{*c}[\sigma_u(\tau), \eta(\tau)]\}} \beta_{ij}(\tau) d\tau, \quad (19)$$

где $t^{(Л)}$ – момент времени, предшествующий определению остаточного ресурса; $t_{*c} = t_{*c}[\sigma_u(\tau), \eta(\tau)]$ – поверхность длительной прочности [2]; β_{ij} – направляющий тензор напряжений; m – экспериментально определяемый параметр.

При определении остаточного ресурса по длительной прочности в соответствии с (3), (4), (19) получаем соотношение

$$\Delta\psi_* = \frac{\ln \left[1 - (1 - e^{-mt_{*o}}) \left(\psi_{ij}(t^{(Л)}) \beta_{ij}^{(o)} + \sqrt{(\psi_{ij}(t^{(Л)}) \beta_{ij}^{(o)})^2 - \psi_u(t^{(Л)}) + 1} \right) \right]}{-mt_{*o}}, \quad (20)$$

где $\Delta\psi_* = (t_* - t^{(Л)})/t_{*o}$ – остаточный ресурс; $t_{*o} = t_{*c}(\sigma_u^{(o)}, \eta_o)$; t_* – общее время до разрушения.

Рассмотрим двухступенчатое нагружение, которое отличается от двухэтапного нагружения тем, что направляющий тензор напряжений остается неизменным в течение всего процесса нагружения. Изменяться могут только интенсивность напряжений и среднее напряжение. Для такого процесса соотношение (22) приобретает следующий вид:

$$\psi_{*2} = \frac{\alpha_{12}}{mt_{*1}} \ln \left\{ e^{m\psi_1 t_{*1}} - (1 - e^{-mt_{*1}/\alpha_{12}}) \frac{e^{m\psi_1 t_{*1}} - 1}{1 - e^{-mt_{*1}}} \right\} - \psi_1 \alpha_{12} + 1. \quad (21)$$

На рис. 2 приведены расчетные и экспериментальные данные по определению остаточного ресурса в условиях ползучести при ступенчатом растяжении. Для кривых 5, 6 значение параметра m определялось из аппроксимации кривой длительной прочности при растяжении. Количественное несоответствие этих кривых экспериментальным данным свидетельствует о недостаточности данных по стационарному нагружению для определения данного параметра.

Для кривых 1–4 значение параметра m определялось по результатам двухступенчатого растяжения с частичной разгрузкой. При этом расчет двухступенчатого нагружения с догрузкой является прогнозным и удовлетворительно согласуется с представленными данными.

Важным практическим приложением полученных результатов является вывод о проведении экспресс-испытаний. Сущность таких испытаний хорошо видна из данных рис. 3. Суммарное время до разрушения $t_{*\Sigma}$ определяется соотношением

$$t_{*\Sigma} = \psi_1 t_{*1} + \Delta\psi_2 t_{*2}, \quad (22)$$

где $\Delta\psi_2$ определяется выражением (21).

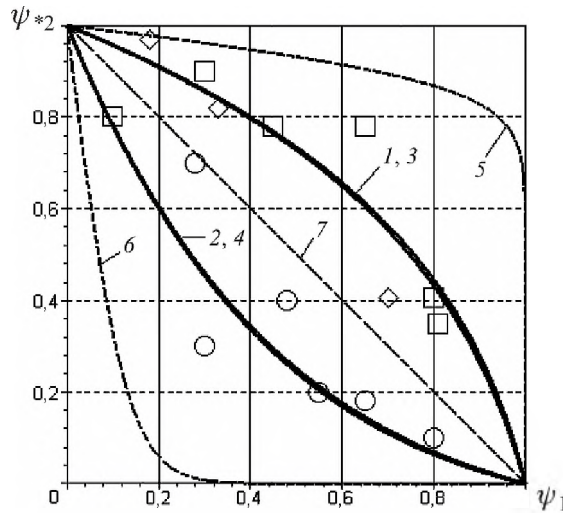


Рис. 2. Остаточный ресурс длительной прочности при двухступенчатом растяжении: 1–6 – расчет по (21); 1, 2 – $m = 0,04$; 3, 4 – $m = 0,015$; 5, 6 – $m = 0,32$; 1, 5, \square – $t_{*1} = 7,05$; 2, 6, \circ – $t_{*1} = 64$; 3, \diamond – $t_{*1} = 7,6$; 4 – $t_{*1} = 153$; \square , \circ – эксперимент [6], сталь 316 при 550°C ; \diamond – эксперимент [7], сплав XH70BMTIO при 800°C .

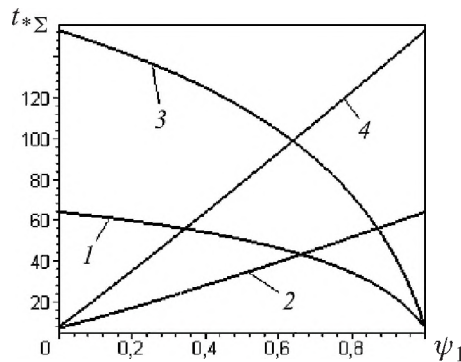


Рис. 3. Суммарное время до разрушения при двухступенчатом растяжении. Обозначения те же, что и на рис. 2.

Вместо долгосрочных испытаний на длительную прочность при небольших напряжениях можно проводить двухступенчатое нагружение с частичной разгрузкой для определения $t_{*\Sigma}$, с последующим определением из (22) величины t_{*2} . При больших значениях ψ_1 , согласно приведенным данным, длительность испытаний можно сократить более чем в два раза.

Резюме

Наведено результати, що дозволяють створити алгоритм визначення залишкового ресурсу в рамках тензорного підходу до опису пошкоджень мате-

ріалів при непружному деформуванні. Одержано явні кінцеві критеріальні залежності для визначення залишкового ресурсу, що узагальнюють відомі співвідношення на більш широкий випадок процесів навантажень.

1. *Михалевич В. М.* Тензорні моделі накопичення пошкоджень. – Вінниця: “Універсум-Вінниця”, 1998. – 195 с.
2. *Лебедев А. О., Михалевич В. М.* До теорії тривалої міцності // Доп. НАН України. – 1998. – № 5. – С. 57 – 62.
3. *Лебедев А. А., Михалевич В. М.* О выборе инвариантов напряженного состояния при решении задач механики материалов // Пробл. прочности. – 2003. – № 3. – С. 5 – 14.
4. *Дель Г. Д., Томилов Ф. К., Богомолов Ю. С.* Пластичность металлов при немонотонном деформировании // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1982. – № 6. – С. 34 – 37.
5. *Красневский С. М., Макушок Е. М., Щукин В. Я.* Разрушение металлов при пластическом деформировании. – Минск: Наука и техника, 1983. – 176 с.
6. *Гомюк Р., Бюи-Куок Т., Бирон А., Бернард М.* Изучение поведения нержавеющей стали 427 при нагружении по схемам усталости, ползучести и совместного действия ползучести и усталости // Совр. машиностроение. – Сер. Б. – 1991. – № 1. – С. 14 – 23.
7. *Закономерности ползучести и длительной прочности: Справочник /* Под общ. ред. С. А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – 101 с.

Поступила 04. 11. 2005

Abstracts

Lebedev A. A. and Mikhalevich V. M. The Critical Equations for Residual Life Estimation of Materials // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 31–38.

We present data that make it possible to develop an algorithm for determination of the material residual life within the framework of the tensor approach to the description of material damage under inelastic deformation conditions. We derived the explicit critical equations for determination of residual life, which enable the extension of known relations to a wider range of loading processes.

Landes J. D. and Donoso J. R. Review of New Formats for Fracture Mechanics Parameters // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 39–45.

New methods to formulate fracture mechanics parameters are presented. These include the common format that relates the deformation behavior of a cracked structure or specimen to the deformation behavior of a tensile test and the concise format that suggests a shortened form of common fracture mechanics parameters to replace the usual polynomial formulations. These forms may give an easier way to use the fracture mechanics parameters in analytical calculations.

Karzov G. P., Timofeev B. T., and Chernaenko T. A. The Analysis of the Damage Events of Austenite Steel Pipelines in Nuclear Power Industry // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 46–55.

The events of damages of pipelines from Cr18Ni10Ni steel were analyzed using the experience of prolonged operation of NPP with RBMK and WWER reactors. It has been shown that the main damage mechanism of welded joints of pipelines from this steel is the intergranular stress corrosion cracking. The reason for such damages is a combined effect of the high level of stresses, and a considerable content of oxygen in coolant and steel sensitization in heat-affected zone of piping welded joints. The compensating measures which make possible to minimize the intergranular stress corrosion cracking negative effect during operation are discussed.

Ziliukas A. Two-Parametrical Fracture Criterion // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 56–63.

We demonstrate that semi-brittle or semi-plastic solids require more comprehensive fracture interpretation, than brittle or plastic ones. Application of two-parametrical fracture criterions make it possible to solve this problem and to provide more reliable estimation of mechanical behavior of materials.

Pecinka L. and Moravka S. In-Service Inspections of Thick Walled Concrete Structures // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 64–78.

Ageing management and renewal of the operating license of existing NPP's are at present the main problems of nuclear power industry. For the ageing management of concrete structures the OECD-Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety on Nuclear Installations defined as the first priority ISI techniques for reinforced concrete structures having thick sections and areas not directly accessible for inspections. We discuss the NRI Rez research and development program in this field, as well as results, which will be used for qualification of the ISI techniques.

Kravchuk L. V., Kuriat R. I., Buiskikh K. P., Zadvornyi E. A., and Kiselevskaya S. G. Study of Damage Kinetics of Heat-Resistant Alloys Subjected to Thermocyclic Loading in a Gas Flow // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 79–86.

We present results of study of damage kinetics of structural components made of heat-resistant alloys, including those with protective coatings, under thermocyclic loading conditions. The stress-strain state impact on crack propagation in thermal fatigue loading condition is analyzed.

Bazhenov V. A., Gulyar A. I., Piskunov S. O., and Shkryl' A. A. Evaluation of Gas Turbine Blade Life under Creep Conditions within Framework of the Continual Fracture Mechanics // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 87–93.

Auzins J. P. and Boyko A. F. Analysis of the Sensitivity of a Vibration-Based Procedure for Structural Identification // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 140–147.

We analyze the accuracy of estimation of structural component material properties (elastic modulus, Poisson's ratio, density, etc.) using the technique for measuring the eigen frequencies of oscillations. The accuracy of frequency estimation using the Fourier method and its influence on the final result are evaluated. Relationships between the errors in the frequency estimation and those in the identified parameters are derived using the meta-model method. Application of the method is illustrated by the example of a shell element with a stiffening rib.

Zheldubovskii A. V., Pogrebnyak A. D., and Regul'skii M. N. Critical State Calculation for Aluminum Alloys under Asymmetric Tension–Compression Cycling Conditions // Problems of Strength. – 2006. – No. 4. – P. 148–155.

The problem of fatigue strength calculation of aluminum alloys under combined action of static and cyclic loading is discussed. We performed calculation on the base of ultimate state models, which allow one to describe all known forms of stress-range diagrams.

Вниманию подписчиков!

Подписаться на журнал «Проблемы прочности» можно, как обычно, в местных отделениях связи. Журнал включен в каталоги Украины и России.

Наш индекс – 70730.

Подписку на наш журнал Вы можете оформить непосредственно в редакции журнала с любого очередного номера.

Цена одного номера с учетом почтовых расходов в 2006 году составит:

– в пределах Украины 30 грн. (~ 6.0 USD).

– за пределами Украины 300 рос. руб. (~ 10.0 USD).

Почтовые переводы направлять по адресу:

01014, Киев–14, ул. Тимирязевская, 2.

Редакция журнала «Проблемы прочности»

Шинкаренко Нине Михайловне.

Справки по телефону: (044) 286 5657.

Отдельным письмом так же необходимо сообщить в редакцию требуемое количество номеров, сумму и дату отправки перевода, указать свой почтовый адрес. Отправка журналов осуществляется после поступления денег подписчика.