

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Приведен обзор основных результатов исследований в области надежности и долговечности технических систем, полученных в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины в период с 2009 г. по 2013г. Рассмотрены вопросы повышения долговечности конструкционных материалов за счет проведения энергетической обработки в условиях ползучести, технической диагностики и прогнозирования ресурса технических систем, надежности эргатических систем. Показано, что введение промежуточной энергетической обработки сплава АМг6М при испытаниях на ползучесть повышает его характеристики кратковременной и длительной прочности. Разработаны методы прогнозирования и оценки возможности продления безопасной эксплуатации объектов, исчерпавших нормативный срок службы, на основе экспертного оценивания и технической диагностики. Предложен подход для определения комплексных показателей надежности эргатических систем, который базируется на модели надежности в виде последовательной восстанавливаемой системы. Полученные соотношения позволяют рассчитывать показатели структурной и функциональной надежности эргатических систем при априорной неопределенности параметров надёжности.

Наведено огляд основних результатів досліджень в області надійності та довговічності технічних систем, отриманих в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України в період з 2009 р. по 2013р. Розглянуті питання підвищення довговічності конструкційних матеріалів за рахунок проведення енергетичної обробки в умовах повзучості, технічної діагностики і прогнозування ресурсу технічних систем, надійності ергатичних систем. Показано, що введення проміжної енергетичної обробки сплаву АМг6М при випробуваннях на повзучість підвищує його характеристики короточасної і тривалої міцності. Розроблено методи прогнозування і оцінки можливості продовження безпечної експлуатації об'єктів служби, що висчерпали нормативний строк, на основі експертного оцінювання та технічної діагностики. Запропоновано підхід для визначення комплексних показників надійності ергатичних систем, що базується на моделі надійності у вигляді послідовної відновлюваної системи. Отримані співвідношення дозволяють розраховувати показники структурної і функціональної надійності ергатичних систем при априорній невизначеності параметрів надійності.

The basic research results on the reliability and life of technical systems, obtained by the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine during 2009 – 2013, are reported. The problems for increasing the life of structural materials due to energy treatment under creep conditions, technical diagnosis and prediction of resource of technical systems, the reliability of ergatic systems are examined. It is shown that introduction of energy treatment of the AMg6M alloy improves its characteristics of the short- and long-term strength in creep testing. Methods of prediction and assessment of the possibility of prolonging a safe operation of objects reaching the limit of a normal life are developed relying on expert assessment and technical diagnosis. An approach to determination of complex indices of the reliability of ergatic systems, based on the reliability model as a sequential repairable system, is proposed. The relations derived allow calculations of indices of the structural and functional reliability of ergatic systems when the reliability parameters are not determined a priori.

Повышение долговечности конструкционных материалов за счет проведения энергетической обработки в условиях ползучести. Повышение надежности и долговечности элементов конструкций является одной из важнейших задач современного машиностроения. Особую актуальность эта проблема представляет для изделий длительного функционирования при постоянных нагрузках и повышенных температурах, когда происходит накопление внутренних микроочагов повреждения и, как следствие, преждевременное разрушение узлов. Поэтому чрезвычайно важным является создание новых технологий упрочняющей обработки конструкционных материалов с целью улучшения их показателей долговечности. Перспективны в этом аспекте технологические разработки, базирующиеся на использовании принципов синергетики. Здесь речь идет о том, что в экстремальных условиях внешнего энергетического нагружения за счет непрерывного притока энергии в материале, приведенном в термодинамически неравновесное состояние, инициируются самоорганизационные процессы с образованием новых диссипа-

© В. П. Пошивалов, 2013

тивных структур, следствием чего и является скачкообразное изменение качественного состояния материала.

При выборе конструкционного материала для некоторых ответственных узлов авиационной и космической техники предпочтение отдается алюминиевым сплавам, в частности алюминий-магний, которые наряду с достаточно высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью менее склонны к хрупкому разрушению, чем стали. Однако увеличение эксплуатационных нагрузок и гарантийных сроков эксплуатации указанных конструкций вынуждает вести постоянный поиск путей совершенствования используемых конструкционных материалов. Широкие возможности по управлению их свойствами открываются с позиции синергетического подхода.

Одним из способов энергетического нагружения, способного инициировать самоорганизационные процессы в металлических материалах, является применение комбинированного энергетического нагружения, включающего воздействие высоких механических нагрузок при электростимулированном нагреве и высокочастотных колебаний (ударных ультразвуковых и электромагнитных).

Известно, что в условиях деформации поле напряжения неоднородно, пластическая деформация тоже неоднородна и развивается локально в областях концентрации напряжения. При достижении критических уровней напряжения в локальных зонах происходит диссипация упругой энергии. Это позволяет использовать синергетический подход к описанию пластической деформации и рассматривать нагружаемый объект как далекую от равновесия диссипативную систему. Образующиеся волны пластичности (известно, что пластическая деформация носит волновой характер) являются результатом самоорганизации элементарных актов пластического течения в локальных зонах концентрации напряжения.

При электростимулированном нагреве за счет пропускания тока через образец имеет место как интегральный джоулевый разогрев материала, так и электронно-дислокационное взаимодействие, что интенсифицирует процесс пластической деформации.

При ударном ультразвуковом воздействии энергия удара выделяется в небольшом поверхностном объеме, измельчая структуру и перераспределяя напряжения. Поверхностный слой становится наноструктурированным.

Воздействуя на материал электромагнитными колебаниями в диапазоне частотной синхронизации с частотой релаксационных актов деформируемого материала, можно вызвать акустопластический резонанс, что является эффективным средством интенсификации процесса пластического деформирования, способным вызвать самоорганизационные явления.

В 2009 – 2013 годах в отделе надежности и долговечности технических систем проводились работы по разработке технологических процессов обработки конструкционных материалов на основе использования принципов синергетики [1 – 6].

Разработанная методика повышения характеристик длительной прочности конструкционных материалов апробирована на образцах деформируемого алюминий-магниевого сплава АМг6М, которые подвергались энергетической обработке по следующей схеме.

Энергетическая обработка включала:

- электростимулированный нагрев образцов до температуры $T = 160^{\circ}\text{C}$ за счет прохождения сквозь них электрического тока;
- одноосное растяжение образцов в режиме ползучести с последующей их выдержкой приблизительно до половины времени разрушения;
- сжимающую нагрузку образцов при температуре $T = 300^{\circ}\text{C}$;
- отжиг образцов при $T = 320^{\circ}\text{C}$;
- воздействие ударными ультразвуковыми колебаниями.

Ударная ультразвуковая обработка проводилась в упругой зоне деформирования при одноосном растяжении.

Испытания на ползучесть проводились по ускоренному режиму: выдержка под нагрузкой $P = 2100\text{ Н}$ в условиях одноосного растяжения при температуре $T = 160^{\circ}\text{C}$.

Действие энергетических потоков на материал оценивалось по изменению характеристик кратковременной прочности (предел прочности σ_B и предел текучести $\sigma_{0,2}$), длительной прочности (время до разрушения при ползучести τ), удельной работы разрушения образца W , а также по микроструктурным изменениям.

Промежуточная пластическая деформация при испытаниях на ползучесть обеспечивалась двумя путями.

В первом случае образцы выдерживались приблизительно до половины времени разрушения, после разгрузки и охлаждения подвергались действию высокотемпературной сжимающей нагрузки, затем осуществлялась ударная ультразвуковая обработка, после чего образцы снова выводились на режим ползучести до разрушения [3, 5].

Во втором случае после действия высокотемпературной сжимающей нагрузки проводился отжиг образцов при температуре $T = 320^{\circ}\text{C}$ на протяжении 2-х часов с последующим воздействием на них ударных высокочастотных колебаний.

Результаты этих исследований приведены в таблице 1, где τ_1/τ_0 – отношение времени разрушения образца, обработанного по вышеописанной схеме (I, II), к времени разрушения контрольного образца.

Анализ результатов испытаний образцов в исходном состоянии и после энергетической обработки показал, что проведение промежуточной пластической деформации в условиях ползучести повышает характеристики кратковременной прочности и время до разрушения сплава АМг6М (см. таблицу 1). Как видно из таблицы 1, при испытаниях по первой схеме существенным образом повышается время разрушения при ползучести, однако при этом резко снижается пластичность материала. Введение отжига позволяет повысить время разрушения сплава при относительном сохранении показателя пластичности. Характеристики прочности сплавов АМг6М и 01570 приведены в таблице 1.

Для сравнения в таблице 1 приведены характеристики прочности алюминиевого сплава 01570 на основе системы Al – Mg, легированного скандием. Этот сплав содержит около 6 % Mg и близок к сплаву АМг6М по технологическим свойствам в металлургическом производстве. В настоящее время сплав 01570 является самым прочным свариваемым сплавом из числа свариваемых термически неупрочняющихся алюминиевых сплавов.

Таблица 1

Материал	Режим обработки	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности, σ_B , МПа	Удельная работа разрушения, W , МДж/м ³	Относительное удлинение, δ , %	Время до разрушения, τ , 60 ⁻¹ с	$\frac{\tau_1}{\tau_0}$
АМг6М	Контр.	167,0	333,0	68,2	20	8	–
	Схема I	440,0	483,0	17,2	4	240	30
	Схема II	250,0	378,0	48,9	14	64	8
01570	Контр.	310,0	410,0	57,3	16	–	–

Однако он принадлежит к ряду дорогих сплавов, что ограничивает его широкое применение.

Введение промежуточной энергетической обработки сплава АМг6М при испытаниях на ползучесть повышает его характеристики кратковременной и длительной прочности. Эффект упрочнения в этом случае обуславливается как залечиванием дефектов, так и повышением плотности дислокаций.

Надежность и долговечность. Для обоснованного определения срока эксплуатации конструкций, работающих в экстремальных условиях, особую важность представляет вопрос разработки методов прогнозирования длительной прочности различных классов конструкционных материалов, работающих в широком диапазоне напряжений и температур. При этом применяемые определяющие соотношения должны быть, с одной стороны, физически обоснованными, а с другой – достаточно простыми и удобными для использования в инженерных расчетах.

Поскольку процесс деформирования при ползучести протекает неравномерно в пределах одного и того же образца, то имеет место большой разброс данных по времени до разрушения даже в идеальных лабораторных условиях проведения эксперимента. Наиболее естественный путь описания разброса заключается в построении физически адекватной вероятностной модели разрушения и использовании методов статистической физики. Этот путь, в применении к рассматриваемой проблеме, связан с большими трудностями из-за сложности и разномасштабной неоднородности структурных элементов твердых тел. Возможности получения таким образом количественных характеристик долговечности современных технических материалов весьма ограничены. С прикладной точки зрения более эффективным является применение статистических методов, опирающихся на прямые экспериментальные данные по разбросу времени до разрушения и построение простейших вероятностных моделей разрушения при ползучести.

В отделе разработан метод определения времени до разрушения конструкционных материалов при изотермической ползучести в условиях одноосного стационарного нагружения на основе деформационного критерия отказа, который предполагает, что существует зависимость между вероятностью неразрушения и накопленной деформацией ползучести [7].

Построенная стохастическая модель разрушения позволяет по заданному уровню доверительной вероятности и напряжению адекватно определять функцию распределения времени до разрушения, тем самым более точно прогнозировать долговечность элементов конструкций, работающих в усло-

виях ползучести [8]. Вопросы параметрической надежности и использование энтропийных методов в моделях долговечности рассмотрены в [9 – 11].

Техническая диагностика и прогнозирование ресурса технических систем. В настоящее время достаточно четко просматривается тенденция, заключающаяся в том, что у многих сложных технических систем, изготовленных в Советском Союзе, закончились гарантийные сроки эксплуатации. Возможность продления срока эксплуатации этих изделий в дальнейшем представляет серьезный резерв для экономии средств, материалов, энергии и трудовых затрат.

В связи с отсутствием во многих случаях статистической и другой информации об объекте исследования, а также надежных методов определения соответствия математических моделей реальным объектам, экспертные оценки являются одними из возможных средств решения многих задач.

В отделе получен ряд важных результатов в области технической диагностики с использованием метода акустической эмиссии и на основе экспертного подхода, которые позволяют обоснованно определять возможность продления безопасной эксплуатации объектов, исчерпавших нормативный срок службы [12 – 17].

Метод акустико-эмиссионной диагностики в последние десятилетия нашел широкое применение в промышленности, а также в области фундаментальных исследований физики прочности и разрушения материалов благодаря значительному прогрессу в электронной и вычислительной технике. Зарождение и развитие трещин, пластическая деформация, коррозионное растрескивание, фазовые превращения и другие процессы динамической перестройки структуры материала сопровождаются излучением акустических (ультразвуковых) сигналов акустической эмиссии (АЭ). Регистрация сигналов АЭ, определение параметров и координат источников сигналов АЭ позволяет на ранних стадиях структурных изменений идентифицировать дефекты структуры материала, контролировать скорость их развития, оценивать степень их опасности и прогнозировать остаточный ресурс работы материала и конструкции в целом. Метод акустико-эмиссионной диагностики как метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации исследуемых объектов, обладает не только более высокой производительностью (в сотни раз превосходящей производительность классических методов неразрушающего контроля, таких как ультразвуковой, магнитный, радиационный и др.), но и дает ответ на главный вопрос – имеются ли в конструкционных материалах потенциально опасные дефекты, которые в будущем могут стать причиной разрушения (роста трещин), а также позволяет оценить степень их опасности. Метод АЭ позволяет формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект, а это дает возможность нового подхода к решению задач повышения долговечности конструкций, который развивается в последнее время и базируется на изучении физических процессов, происходящих в конструкционных материалах при эксплуатации.

В работе [15] акустическая активность материала оценивалась в процессе одноосного статического растяжения образцов как в исходном состоянии, так и после энергетической обработки. Результаты проведенных исследований на примере сплава АМгбМ подтвердили тот факт, что по характеристикам

АЭ-картины можно судить о динамических процессах структурной перестройки в материалах. Использование АЭ-метода контроля позволяет своевременно выявлять развивающиеся, и поэтому потенциально опасные для конструкции, дефекты.

Надежность эргатических систем. Крупные аварии и катастрофы конца XX века и начала XXI века, которые состоялись непосредственно или косвенно по вине человека, в очередной раз обратили внимание на проблему человеческого фактора. Обобщая известные официальные данные, можно прийти к заключению: экономические и социальные потери авиационных, транспортных, энергетических, химических и нефтехимических компаний обусловлены тем, что от 50 до 80 % всех аварий и нарушений технологического режима случаются по вине оперативного персонала.

Эргатические системы представляют собой автоматизированные технические системы с присутствием в их функционировании человека-оператора. Обеспечение функциональной стабильности сложных эргатических систем, использующих гибридные человеко-машинные технологии обработки информации, является актуальной проблемой для автоматизированных систем, которые обеспечивают функционирование критических систем управления.

В [18 – 21] предложен подход для определения комплексных показателей надежности эргатических систем, который базируется на модели надежности в виде последовательной восстанавливаемой системы. Полученные соотношения позволяют рассчитывать показатели структурной и функциональной надежности эргатических систем при априорной неопределенности параметров надёжности.

1. *Переверзев Е. С.* Поведение деформационно-упрочненного сплава АМг6М в эквивалентных условиях нагрева электрическим током и путем теплопередачи / *Е. С. Переверзев, Д. Г. Борщевская, С. П. Федий, В. Ф. Бутенко* // *Техническая механика*. – 2009. – № 1. – С. 106 – 110.
2. *Переверзев Е. С.* Влияние комплексного энергетического нагружения на ползучесть сплава АМг6М / *Е. С. Переверзев, Д. Г. Борщевская, С. П. Федий, В. Ф. Бутенко* // *Техническая механика*. – 2009. – № 4. – С. 122 – 125.
3. Патент на винахід 46841 Україна, МПК С21D 1/04. Спосіб зміцнення металевих матеріалів / *Е. С. Переверзев, Д. Г. Борщевська, В. Ф. Бутенко, В. Д. Рябчий, С. П. Федій*; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – u200906775; заявл. 30.06.2009; опубл. 11.01.2010. Бюл. № 1. – 4 с.
4. *Борщевская Д. Г.* Повышение долговечности сплава Мг6М за счет введения промежуточной пластической деформации / *Д. Г. Борщевская, В. Д. Рябчий, В. Ф. Бутенко, И. И. Телегина* // *Техническая механика*. – 2011. – № 1. – С. 78 – 80.
5. Патент на винахід 56740 Україна, МПК С21D 1/04. Спосіб підвищення довговічності металевих матеріалів / *Д. Г. Борщевська, В. Д. Рябчий, В. Ф. Бутенко, А. В. Ханнанов*; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – u201008347; заявл. 05.07.2010; опубл. 25.01.2011. Бюл. № 2. – 4 с.
6. *Пошивалов В. П.* Підвищення довговічності сплаву АМг6М за рахунок проведення енергетичної обробки в умовах повзучості / *В. П. Пошивалов, Д. Г. Борщевська, В. Д. Рябчий, И. И. Телегина* // *ФХММ*. – 2013. – № 6. – С. 46 – 53.
7. *Пошивалов В. П.* Об одном возможном подходе к определению времени до разрушения в условиях ползучести / *В. П. Пошивалов* // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 1993. – № 2. – С. 56 – 60.
8. *Дояр И. А.* Вариант вероятностной оценки времени до разрушения при ползучести / *И. А. Дояр, В. П. Пошивалов* // *Техническая механика*. – 2013. – № 2. – С. 99 – 108.
9. *Переверзев Е. С.* Параметрические модели надежности технических систем / *Е. С. Переверзев* // *Техническая механика*. – 2008. – № 2. – С. 85 – 95.
10. *Переверзев Е. С.* Случайные процессы в моделях "нагрузка – прочность" / *Е. С. Переверзев* // *Техническая механика*. – 2009. – № 3. – С. 110 – 115.
11. *Переверзев Е. С.* Вероятностные и энтропийные методы в моделях долговечности / *Е. С. Переверзев* // *Техническая механика*. – 2011. – № 1. – С. 83 – 89.
12. *Пошивалов В. П.* Управление вероятностными показателями ресурса сложных технических систем / *В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Даниев* // *Информационные технологии в управлении сложных систем*: Сбор-

- ник докладов научной конференции (Днепропетровск, 2011). – Днепропетровск : изд-во «Свидлер А.Л.», 2011. – С. 351 – 354.
13. *Бигус Г. А.* Техническая диагностика опасных производственных объектов // *Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев.* – М. : Наука, 2010. – 415 с.
 14. *Бигус Г. А.* Вейвлет-анализ сигналов акустической эмиссии при диагностике конструкции / *Г. А. Бигус, А. А. Травкин, Ю. Ф. Даниев* // Сварка и контроль. – 2012. – № 4. – С. 34 – 39.
 15. *Пошивалов В. П.* Акустическая активность сплава АМг6М в условиях энергетического нагружения / *В. П. Пошивалов, Д. Г. Борщевская, В. Д. Рябчий, И. И. Телегина* // Техническая механика. – 2012. – № 3. – С. 91 – 95.
 16. *Переверзев Е. С.* Принятие предпочтительных управленческих решений / *Е. С. Переверзев, В. П. Пошивалов* // Методы менеджмента качества. – 2002. – № 5. – С. 41 – 43.
 17. *Пошивалов В. П.* Экспертная оценка продления срока эксплуатации сложных технических систем / *В. П. Пошивалов* // Техническая механика. – 2011. – № 4. – С. 122 – 125.
 18. *Пошивалов В. П.* Оцінка працездатності складних ергатичних систем / *В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Даниєв* // Вісник Академії митної служби України. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. № 1(41). – С. 32 – 37.
 19. *Пошивалов В. П.* Визначення комплексних показників надійності ергатичних систем / *В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Даниєв, О. В. Пошивалова* // Вісник Академії митної служби України. – Дніпропетровськ, 2010. – № 1(43). – С. 111 – 119.
 20. *Пошивалов В. П.* Підтвердження показників надійності функціонування ергатичних систем на основі імовірнісного моделювання / *В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Даниєв* // Вісник Академії митної служби України. – Дніпропетровськ, 2010. – № 2(44). – С. 122 – 128.
 21. *Пошивалов В. П.* Оцінка показників надійності ергатичних систем у байєсовських моделях / *В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Даниєв* // Вісник Академії митної служби України. – Дніпропетровськ, 2011. – № 2(46). – С. 96 – 102.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено: 08.10.13,
в окончательном варианте 28.10.13