

УДК 539.3

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМЦ

А. А. Рябов¹, В. И. Романов¹, Ю. А. Вяткин^{1,2}, М. А. Пухов^{1,2}

¹Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

²Национальный исследовательский ядерный университет – МИФИ,
Саровский физико-технический институт, Саров

В работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований ползучести алюминиевого сплава АМЦ. Численные исследования выполнены на основе пакета программ ЛОГОС. Приведено описание методов получения параметров материальных функций на основе экспериментальных данных. Выполнен сравнительный анализ численных и экспериментальных результатов ползучести плоского образца, подверженного действию постоянной нагрузки в течение 30 часов.

Ключевые слова: эксперимент, расчет, ползучесть, диаграмма, конечно-элементная модель, граничные условия, деформации ползучести, скорость деформаций, материальные функции.

Введение

Современные тенденции эксплуатации конструкций в условиях постояннодействующих термосиловых нагрузок при постоянном ужесточении требований по снижению металлоемкости и безопасности работы изделий диктуют необходимость проведения высокоточных численных расчетов в условиях, близких к реальным, и прогнозирования возможных разрушений.

Особую роль в оценке прочности конструкций играют необратимые деформации, обусловленные кратковременными или длительными нагрузками, вызывающими напряжения, превышающие предел текучести, либо относительно невысокие термосиловые воздействия, приводящие к деформациям ползучести, либо релаксацию напряжений, меняющихся во времени даже при постоянной нагрузке [1].

Практически все существующие конструкционные материалы, включая металлы, при различных температурах и уровнях напряжений в той или иной мере обладают свойствами ползучести. Так, даже при комнатной температуре обычные конструкционные стали за пределом пропорциональности обнаруживают свойства так называемой ограниченной ползучести, при которой деформации с увеличением времени асимптотически стремятся к конечному пределу [2]. Некоторые металлы, как, например, свинец, склонны к образованию «холодной ползучести», при которой деформации ползучести проявляются уже при нормальной температуре даже при напряжениях ниже предела пропорциональности.

На практике же деформациями ползучести часто пренебрегают в силу их малости по сравнению с упругими или пластическими деформациями. Однако встречаются случаи, когда пренебрежение ими могут приводить к существенным ошибкам определения НДС исследуемых объектов.

Экспериментальное исследование НДС реальных конструкций с учетом деформаций ползучести является весьма затратным, а зачастую и невозможным. Поэтому актуальной является проблема численного исследования ползучести и прогнозирования деформаций изделий во времени при действии термосиловых нагрузок.

Одним из наиболее важных вопросов при расчетах ползучести является вопрос выбора исходной системы уравнений, корректно описывающих деформации ползучести, и построения физически обоснованных моделей.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается высокопроизводительный многофункциональный программный комплекс ЛОГОС [3] решения задач прочности и тепло-массопереноса для развития суперкомпьютерных технологий наукоемких отраслей промышленности России.

В работе изложены результаты численного моделирования ползучести алюминиевого сплава АМЦ с использованием пакета ЛОГОС. Разработка и программная реализация алгоритмов математической модели термползучести выполнена на основе работ С.А. Капустина [4 – 6]. Эталонные результаты экспериментальных исследований ползучести на плоских образцах из алюминиевого сплава АМЦ получены Пуховым М. А. в лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ кафедры ТиЭМ.

1. Модель ползучести

Функциональный блок ползучести в пакете программ ЛОГОС основан на составной иерархической модели поврежденного материала [7 – 13] в рамках соотношений механики поврежденной среды [4 – 5, 14]. Описание общей модели ползучести и алгоритмы определения входящих в нее материальных функций подробно изложены в [4 – 6]. В настоящей работе используется модель, основанная на гипотезах существования поверхности ползучести в пространстве девиаторов напряжений σ'_{ij} , и градиентальности к ней вектора скорости деформации ползучести $\dot{\epsilon}^c_{ij}$ [5]. Скорость деформаций ползучести связана с девиатором эффективных напряжений σ'_{ij} соотношениями:

$$\dot{\epsilon}^c_{ij} = \sigma'_{ij} \cdot L(T, \theta) \cdot H(T, r, \theta), \quad (1)$$

где $L(T, \theta) = \left| \dot{\epsilon}^c_{ij} \right| / \left| \sigma'_{ij} \right|$ – функция, характеризующая начальную скорость ползучести, отнесенную к единичному напряжению при уровне напряжений, определяемых параметром θ :

$$\theta = \frac{\left| \sigma'_{ij} \right|}{C_c} - 1, \quad (2)$$

$C_c = C_c(T)$ – радиус поверхности ползучести, зависящий только от температуры; $H(T, r, \theta)$ – функция упрочнения, характеризующая изменение начальной скорости ползучести $\dot{\epsilon}^c_{ij}$ от параметра упрочнения r (при $r_0 = 0$, $H(T, \theta, r_0) = 1, 0$).

2. Экспериментальные исследования

Исследования ползучести алюминиевого сплава АМЦ проводились при температуре $T = 20$ °С [15] на универсальной прецизионной испытательной машине Shimadzu AG-X, имеющей два измерительных канала для усилия и перемещения. Машина позволяет развивать усилие до $F_{\max} = 100$ кН в диапазоне изменения скорости перемещения траверсы 0,0005 – 1000 мм/мин (скорость деформирования в опытах на одноосное растяжение или сжатие $\epsilon' = 10^{-4} \div 10^2$ с⁻¹). Управление испытанием и обработка результатов экспериментов производится программным комплексом Autograph TrapeziumX.

В исследованиях ползучести использовались стандартные плоские образцы, закрепленные по зажимной части с одной стороны и нагруженные постоянным усилием в течение времени $t = 30$ часов с другой стороны. Испытание образцов проводилось в два этапа:

- одноосное растяжение образцов;

- ползучесть образцов при выбранных уровнях удельных напряжений.

Испытания серии образцов на одноосное растяжение проходили при скорости деформации $1,4 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и позволили получить диаграмму деформирования (рис. 1) и прочностные характеристики сплава АМЦ: $\sigma_{0,2} = 100 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{пл}} = 98,4 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{в}} = 278 \text{ МПа}$. Зеленой линией на рис. 1 отмечена прямая, параллельная упругому участку диаграммы деформирования, отложенная от начала координат на 0,2 % по оси деформаций, которая необходима для определения предела текучести $\sigma_{0,2}$ материала.

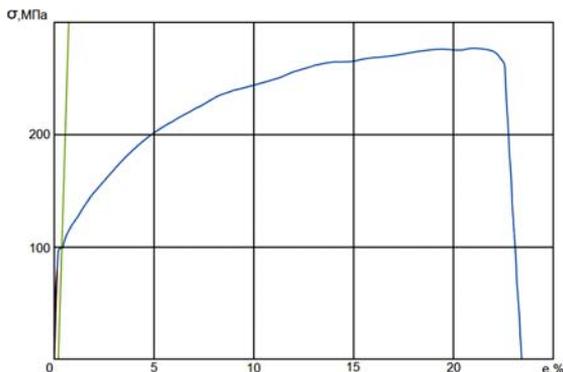


Рис. 1. Диаграмма деформирования сплава АМЦ

Полученное экспериментальное значение предела текучести $\sigma_{0,2}$ использовалось для оценки осевых усилий, необходимых для выявления предела ползучести при трех уровнях нагружения: $\sigma_0 = 0,6 \times (\sigma_{0,2})$, $\sigma_1 = 0,7 \times (\sigma_{0,2})$ и $\sigma_2 = 0,8 \times (\sigma_{0,2})$, а за предел ползучести σ_{cr} сплава АМЦ при нормальной температуре $T = 20^\circ\text{C}$ принята величина $\sigma_{\text{cr}} = 70 \text{ МПа}$. Испытания в течение 30 часов показали, что при уровне напряжений $\sigma_0 = 60 \text{ МПа}$ деформации ползучести отсутствуют. При $\sigma_1 = 70 \text{ МПа}$ отмечено проявление эффектов ползучести с минимальной скоростью нарастания деформаций ползучести, а при $\sigma_2 = 80 \text{ МПа}$ реализуется эффект установившейся ползучести с ярко выраженными стадиями и постоянной скоростью на протяжении всего времени испытания. Зависимости деформации ползучести e_{cr} от времени выдержки под нагрузкой t для напряжений $\sigma_1 = 70 \text{ МПа}$ и $\sigma_2 = 80 \text{ МПа}$ показаны на рис. 2.

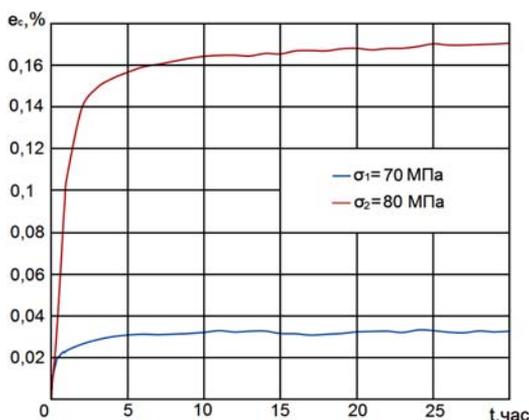


Рис. 2. Кривые ползучести сплава АМЦ при двух уровнях постоянных напряжений

Эксперименты показывают, что при действии постоянного напряжения $\sigma_1 = 70 \text{ МПа}$, вначале испытаний (до 3 часов) зависимость деформаций ползучести от времени носит восходящий характер. Однако при достижении предельного значения скорости ползучести отмечается колебательный характер кривой, при этом осредненное значение скорости ползучести на протяжении всего времени испытания близко к нулю. Такое поведение материала объясняется выбором минимального порогового значения величины постоянного напряжения, при котором эффекты ползучести только начинают проявляться.

3. Определение материальных функций

Константы и функции математических моделей материалов, реализованных в пакете программ ЛОГОС, оснащаются данными на основе выполненных экспериментов. Одноосное растяжение образцов позволило установить фактические упругие константы сплава АМЦ при нормальной температуре: $E = 23$ ГПа; $G = 8,85$ ГПа; $K = 19,2$ ГПа и получить зависимость радиуса поверхности текучести $C_p = C_p(k_p)$ от длины траектории пластической деформации k_p в модели пластичности материала с изотропным упрочнением (табл. 1).

В случае изотропного упрочнения при одноосном растяжении:

$$C_p = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma \text{ при } \sigma \geq \sigma_T^0; \quad k_p = e_{11}^p = e - \sigma/E. \quad (3)$$

Таблица 1

σ , МПа	e , %	σ/E , %	k_p , %	C_p , МПа
100	0,435	0,435	0	81,7
104	0,471	0,452	0,019	84,9
106	0,496	0,461	0,035	86,5
108	0,529	0,469	0,06	88,1
110	0,592	0,478	0,114	89,8
123	1,0	0,535	0,465	100,4
147	2,0	0,639	1,361	120,0
168	3,0	0,730	2,27	137,2
190	4,0	0,826	3,174	155,1
202	5,0	0,878	4,122	164,9
208	6,0	0,904	5,096	169,8
220	7,0	0,957	6,043	179,6
228	8,0	0,991	7,009	186,1
245	10,0	1,065	8,935	200,0

По полученным экспериментальным данным за пороговый уровень напряжений, при котором процессы ползучести отсутствуют, принята величина $\sigma_c^0 = 65$ МПа, при этом начальный радиус поверхности ползучести $C_c = 53$ МПа. Уровням напряжений $\sigma_1 = 70$ МПа и $\sigma_2 = 80$ МПа соответствуют значения $\theta_1 = 0,0920$ и $\theta_2 = 0,1756$. Для получения функций $L(\theta)$, $H^0(t)$ экспериментальные зависимости полных деформаций от времени $e(t)$ перестраиваются в зависимости деформаций ползучести $e_c(t)$: $e_c(t) = e(t) - e(t=0)$. На основе конечно-разностной аппроксимации для каждого уровня напряжений вычисляются значения производных $\dot{e}_c(t_i) = \frac{de_c}{dt}$ для ряда различных значений времени t_i и предварительные значения функций $H^0(t_i)$:

$$H^0(t_i) = \frac{\dot{e}_c(t_i)}{\dot{e}_c(t=0)} \quad (4)$$

Для определения рабочих величин этой функции производится выбор конкретных значений времени t_i , общих для рассмотренных уровней напряжений. На выбранном ряде значений проводится осреднение $H^0(t_i)$ для каждого из напряжений. Функции $L(\theta_k)$ и $l(\theta_k)$ вычисляются на основе соотношений:

$$L(\theta_k) = \frac{3}{2} \frac{(\dot{e}_c^0)}{\sigma_{(k)}} \quad l(\theta_k) = \ln(L(\theta_k)). \quad (5)$$

Полученные таким образом предварительные значения функций $L(\theta)$, $H^0(t)$ затем уточняются на основе численных экспериментов ползучести сплава при напряжениях $\sigma_1 = 70$ МПа и $\sigma_2 = 80$ МПа, и сопоставления численных и экспериментальных результатов.

Представленные в табл. 2 и 3, значения параметров определяют материальные функции модели ползучести $L(\theta)$ и $H^0(t)$ рассматриваемого алюминиевого сплава АМЦ.

Таблица 2

t_i (час)	0	1	2	3	4	8	15	30
$H^0(t_i)$	1,0	0,4	0,21	0,075	0,021	0,01	0,003	0,001

Таблица 3

σ_k , МПа	65	70	80
θ_k	0	0,0920	0,1756
$L(\theta_k)$	0	$6,99 \cdot 10^{-6}$	$2,37 \cdot 10^{-5}$
$l(\theta_k)$	-16	-11,87	-10,65

Следует отметить, что параметры функций $H^0(t_i)$ для модели ползучести определялись по экспериментальным значениям деформаций ползучести, полученным при действии эквивалентного уровня напряжений $\sigma_2 = 80$ МПа.

Ввиду того, что ни одна из представленных экспериментальных кривых не содержит третьего участка неустановившейся ползучести, значение функций V_0^R и s принимались на основе приближенных оценок и выбирались таким образом, чтобы минимизировать влияние данных параметров модели на первых двух участках кривой ползучести.

4. Результаты расчетов

Для расчета ползучести натурального образца при действии двух уровней эквивалентных напряжений, а также исследования сходимости решения построены детальные КЭМ с различной дискретизацией расчетных областей из 8-ми узловых конечных элементов сплошной среды с улучшенными функциями формы:

- КЭМ1 – размерностью 1200 с характерным пространственным разрешением $2,5 \times 0,75 \times 0,67$ мм;
- КЭМ2 – размерностью 9800 с характерным пространственным разрешением $1,25 \times 0,33 \times 0,37$ мм;
- КЭМ3 – размерностью 33000 с характерным пространственным разрешением $0,83 \times 0,22 \times 0,23$ мм.

Определение значений деформаций ползучести проводилось относительно двух фиксированных точек, расположенных друг от друга на расстоянии 50 мм, соответствующем базе расположения датчика измерения деформаций в эксперименте и вычислялось по формуле [15]:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\Delta l_{сумм} - \Delta l_{упр}}{l_0} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $\Delta l_{сумм}$ – суммарное относительное смещение фиксированных точек образца, $\Delta l_{упр}$ – смещение фиксированных точек образца по результатам только упругого решения, l_0 – фиксированная база измерения деформаций.

По результатам исследования сходимости решения, полученным всех конечно-элементных моделях можно отметить, что расчетные значения деформаций ползучести практически совпадают с максимальным отличием значений деформаций ползучести 0,01 %.

Результаты численных расчетов деформаций ползучести $e_c = e_c(t)$ и сравнение с экспериментальными данными приведены на рис. 3.

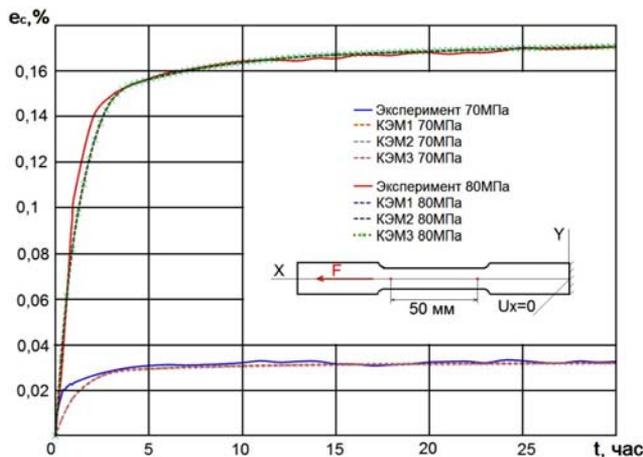


Рис. 3. Зависимость деформации ползучести от времени

Сравнительный анализ показывает, что отличия значений деформаций ползучести для экспериментальной кривой, соответствующей действию эквивалентного напряжения $\sigma = 80$ МПа не превышают 6 % и достигаются на ранней стадии ползучести на интервале $t_0 = 0 \dots 3$ часов.

Расчетные значения деформаций ползучести для экспериментальной кривой, соответствующей действию эквивалентного напряжения $\sigma = 70$ МПа на ранней стадии ползучести на интервале $t_0 = 0 \dots 3$ часов достигают 60 %. Такой уровень отличий объясняется особенностями экстраполяции значений скоростей деформаций ползучести на более низкие значения эквивалентных напряжений.

На переходном участке $t_1 = 3 \dots 5$ часов, значения отличий расчетных значений деформаций ползучести для обоих уровней эквивалентных напряжений не превышают 2 %.

На втором участке $t_2 = 5 \dots 30$ часов отличия значений деформаций ползучести не превышают 1,5 % и стремятся к 0 в конце интервала времени.

На рис. 4 показано распределение деформаций ползучести на момент времени $t = 30$ часов в образце при действии постоянного осевого усилия $\sigma = 80$ МПа.

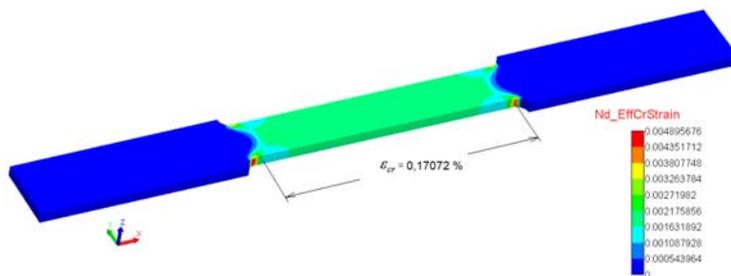


Рис. 4. Деформации ползучести, % в расчетной модели образца

Выводы

1. Выполнено экспериментальное исследование ползучести сплава АМЦ, по результатам которого определены материальные функции модели ползучести, реализованные в программном комплексе ЛОГОС;
2. Проведено имитационное моделирование деформирования плоского образца на основе модели ползучести С.А. Капустина;
3. Исследована сходимость решения задачи на трех КЭМ с различной пространственной дискретизацией расчетных областей;
4. Сравнительный анализ результатов расчетов с экспериментальными данными показал, что максимальные отличия значений деформаций ползучести составляют:

– на первом участке кривой (от 0 до 3 часов) для значения эквивалентного напряжения $\sigma = 80$ МПа $\Delta = 6$ %.

– на переходном участке ко второй стадии ползучести (от 3 до 5 часов) – $\Delta = 2$ %.

– на втором участке кривой (от 5 до 30 часов) $\Delta = 1,5$ %.

Расчетные значения деформаций ползучести на конечный момент времени практически совпадают с экспериментальными данными. Максимальное отличие результатов определения деформаций составило 0,004 %.

По результатам моделирования можно отметить хорошее качественное согласие результатов расчетов и эталонного результата эксперимента, что, в свою очередь, является результатом корректного определения набора материальных функций для модели ползучести.

Заключение

Проведены расчеты ползучести натурального образца из алюминиевого сплава АМЦ в ПП ЛОГОС на основе модели ползучести С. А. Капустина. Описаны результаты экспериментальных исследований ползучести. Проведено сравнение результатов численного решения задачи ползучести в ПП ЛОГОС с экспериментальными результатами.

Литература

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975.
2. Локощенко А. М. Ползучесть и длительная прочность металлов. – М.: Физматлит, 2016.
3. Рябов А. А., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Куделькин В. Г., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В. Параллельный пакет программ ЛЭГАК-ДК для расчета задач гидрогазодинамики и прочности на неструктурированных сетках в лагранже-эйлеровых переменных // X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Нижний Новгород, ННГУ, 24 – 30 августа 2011 г; Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 – 5. – С. 2472 – 2473.
4. Капустин С. А., Чурилов Ю. А., Горохов В. А. Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского, 2015.
5. Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций: монография. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 1999.
6. Бех О. И., Коротких Ю. Г. Уравнения механики поврежденной среды для циклических не-изотермических процессов деформирования материалов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-т, 1989. – С. 28 – 37.
7. Вяткин Ю. А., Капустин С. А., Ярилина И. А. Моделирование поведения конструкций из материалов, свойства которых зависят от текущего вида НДС // Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сборник. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та, 2002. Вып. 64.
8. Вяткин Ю. А., Капустин С. А. Кулагин Ю. М. Моделирование поведения разномодульных материалов на основе гипотез разрыхления вследствие сдвигового деформирования // Приволжский научный журнал. – 2010. – № 1 (13).
9. Капустин С. А., Чурилов Ю. А., Горохов В. А. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях квазистатических термосиловых и терморadiационных воздействий // III школа-семинар «Современные проблемы ресурса материалов и конструкций»: сб. тр. – М.: МАМИ, 2009. – С.90 – 104.
10. Капустин С. А. Численный анализ упруговязкопластических процессов деформирования и разрушения конструкций при квазистатических силовых, тепловых и радиационных воздействиях // Ученые записки казанского университета. Физико-математические науки. – 2010. – Т. 152, кн.4.

11. Горохов В. А., Егунов В. В., Игумнов Л. А., Казаков Д. А., Капустин С. А. Экспериментально-теоретическое изучение процессов деформирования и разрушения конструкционных материалов: электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012.

12. Горохов В. А., Казаков Д. А., Капустин С. А., Чурилов Ю. А. Моделирование ползучести жаропрочных сплавов при высоких температурах и нейтронном облучении // LVII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности»: сб. тез. Севастополь, 24 – 27 мая, 2016.

13. Капустин С. А., Горохов В. А., Васильев Б. А., Виленский О. Ю., Кайдалов В. Б., Осетров Д. Л., Марголин Б. З., Гуленко А. Г. Сравнительный анализ радиационно-термического формоизменения отражателей реакторов БН-600 и БН-800 по результатам численного моделирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 6.

14. Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008.

15. Металлы. Метод испытания на ползучесть. Государственный стандарт Союза ССР. ГОСТ 3248-81. – М.: Изд-во стандартов, 1988.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL CREEP ANALYSIS OF ALUMINUM ALLOY AMTs

A. A. Ryabov¹, V. I. Romanov¹, Yu. A. Vyatkin^{1,2}, M. A. Pukhov^{1,2}

¹Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

²National Research Nuclear University – MEPHI,
Sarov Institute of Physics and Engineering, Sarov

The paper presents the results of experimental and numerical creep analysis of aluminum alloy AMTs. The numerical analysis was carried out using the program package LOGOS. Techniques for determining the parameters of material functions based on experimental data are described. Comparative analysis of the numerical and experimental creep behavior of flat specimen subjected to constant load for 30 hours was carried out.

Key words: experiment, computation, creep, diagram, finite-element model, boundary conditions, creep deformation, strain rate, material functions.

УДК 519.6

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ИНЕЯ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

A. B. Саразов, Р. Н. Жучков

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Образование инея на элементах конструкции летательных аппаратов является актуальной проблемой авиационной промышленности. На сегодняшний день помимо инженерных подходов,