

УДК 539.374; 538.951

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1570Р (СИСТЕМА Al-Mg-Sc)
С ПРИМЕНЕНИЕМ КИНЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ МЕТАЛЛОВ**

© 2025 г. В. М. Грешнов^{а, *}, И. В. Пучкова^{а, **},

^аУфимский университет науки и технологий, Уфа,
Республика Башкортостан, Россия

*E-mail: greshnov_vm@list.ru, **e-mail: puchkova_iv@mail.ru

Поступила в редакцию 04.12.2024 г.

После доработки 19.01.2025 г.

Принята к публикации 09.02.2025 г.

В работе с целью определения перспективности применения кинетической физико-математической теории ползучести металлов для выполнения проектировочных расчетов при создании изделий новой техники излагаются результаты, полученные при описании теорией процессов одноосной ползучести сплава 1570Р в условиях стационарного и скачкообразного изменения термомеханических параметров нагружения. Установлено, что разрабатываемая новая физико-математическая теория ползучести металлов, которая в отличие от классической феноменологической теории учитывает структуру металла и ее изменение в процессе ползучести, одинаково хорошо описывает процесс в стационарных и нестационарных условиях термомеханического нагружения. Показана важная роль структурного состояния металла на протекание ползучести. Основным структурным параметром, определяющим характеристики процесса, является скалярная плотность неподвижных дислокаций.

Ключевые слова: ползучесть металлов, кривая ползучести, история нагружения, структурный параметр, физическое кинетическое уравнение

DOI: 10.31857/S1026351925040099, **EDN:** BNWQHG

1. Введение. Разработанная в Уфимском университете науки и технологий физико-математическая теория больших необратимых деформаций металлов содержит теории пластичности, ползучести, длительной прочности и вязкого разрушения металлов [1–6]. В работах [7, 8] изложена новая технология производства деталей современных авиационных и ракетных двигателей из нового конструкционного алюминиевого сплава 1570Р. Показана перспективность сплава для изготовления ответственных деталей изделий отечественного авиа- и ракетостроения. Важным этапом при проектировании этих изделий является этап прочностных расчетов,

в том числе расчетов на ползучесть деталей, работающих при повышенных температурах.

Ползучесть определяется как процесс накопления остаточных деформаций во времени в нагруженных деталях. Если методы проектировочных расчетов на статическую прочность хорошо разработаны и опубликованы, то расчеты на ползучесть находятся на стадии разработки и совершенствования. Развернутая картина выполнения научных исследований по ползучести в стране и за рубежом за большой промежуток времени (1922–2014) изложена в недавно опубликованной монографии одного из ведущих специалистов в области ползучести и прочности металлов профессора Александра Михайловича Локощенко [9].

Одной из проблем в теории ползучести, которая многие годы не находит решения, является проблема описания нестационарной ползучести, в том числе описания ползучести при ступенчатом изменении напряжения и температуры, а также при резком изменении вида напряженного состояния [10–14]. Решение этой проблемы исключительно важно, так как вышеотмеченные виды нагружения являются наиболее общими при работе машин и механизмов.

Современная кинетическая феноменологическая теория ползучести металлов, которая положена в основу инженерных методов расчета [9, 10], не описывает адекватно эксперименту ползучесть при указанных “контрастных” нагружениях. Например, в работе [15] по результатам большой программы экспериментального исследования ползучести алюминиевого сплава при одноосном растяжении было установлено, что в случае ступенчатого увеличения нагрузки при интенсивностях напряжения σ^c ниже предела пропорциональности феноменологическая теория упрочнения предсказывает заниженные значения интенсивности деформации ползучести ε^c по сравнению с экспериментальными значениями. При интенсивностях напряжения σ^c выше предела пропорциональности теория упрочнения, наоборот, дает завышенные результаты.

Отметим здесь, что эта проблема феноменологических теорий ползучести и длительной прочности металлов является следствием неучета в феноменологическом подходе структуры материала и ее непрерывной эволюции во время протекания физического процесса необратимой деформации. Необратимая деформация потому и протекает, что изменяется структура. Феноменологическая модель — это некоторая зависимость между макропараметрами. При изменении структуры изменяются и сами макропараметры. Для учета этого изменения в феноменологические модели всегда вводятся константы и даже функции, которые называются материальными потому, что определяются на основе экспериментальных данных.

В работе [16] излагаются результаты моделирования экспериментальных кривых ползучести нержавеющей стали при температуре 650 °С, полученных в условиях нестационарного сложного напряженного состояния с применением технических теорий упрочнения и течения. Удовлетворительное описание теориями экспериментальных кривых достигнуто при использовании двух материальных констант, определенных из условия минимального

относительного интегрального расхождения экспериментальных и теоретических кривых ползучести.

В работе [17] излагаются результаты математического моделирования с помощью кинетической теории результатов испытания на длительную прочность меди в условиях нестационарного сложного напряженного состояния, в том числе при скачкообразном изменении интенсивности напряжений.

Отмечается, что хорошее совпадение экспериментальных и теоретических значений времен до разрушения наблюдается при использовании кинетического уравнения для векторного параметра поврежденности, материальные константы которого определены с применением экспериментальных результатов.

Необходимость получения материальных констант и функций существенно усложняет, а иногда делает невозможным применение феноменологических моделей для проектировочных расчетов.

Новая физико-математическая теория ползучести разработана на основе физико-феноменологического подхода, в ней используется действительный структурный параметр – скалярная плотность неподвижных дислокаций и физическое кинетическое уравнение его изменения.

В этой связи является актуальной задача исследования возможностей новой теории при описании ползучести металлов.

В настоящей работе излагаются результаты экспериментального исследования ползучести алюминиевого сплава 1570P в стационарных условиях нагружения и математического моделирования процесса в условиях стационарного и скачкообразного изменения термомеханических режимов деформирования с применением физико-математической теории ползучести металлов, опубликованной в работе [14].

2. Характеристика сплава 1570P. Для экспериментального исследования ползучести сплава образцы изготовили из цилиндрических заготовок, полученных горячим прессованием слитков сплава при температуре $T = 350$ °C (состояние поставки). Химический состав сплава (массовая доля элементов): Al – основа; Ni – 0.1 – 0.5%; Be – 0.0001–0.005%; Mg – 5.6–6.3%; Mn – 0.3–0.6%; Sc – 0.18–0.3%; Zr – 0.05–0.12%; Co – 0.01–0.05%. Микроструктура в заготовках представляет собой равноосные зерна твердого раствора с размером в поперечнике 22 мкм. Характеристики механических свойств сплава в состоянии поставки при 20 °C: предел текучести $\sigma_{02} = 300$ МПа; временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 440$ МПа; относительное удлинение при растяжении до разрыва $\delta = 20\%$; относительное сужение при растяжении до разрыва $\psi = 40\%$; модуль сдвига $G = 27\,000$ МПа; при $T = 150$ °C: $\sigma_{02} = 260$ МПа; модуль сдвига $G = 23\,400$ МПа.

3. Методика и результаты экспериментального исследования ползучести сплава 1570P при стационарных условиях нагружения. Экспериментальную кривую ползучести сплава получали, руководствуясь ГОСТ 3248-81 и ГОСТ 3248-46. Цилиндрические образцы с резьбовыми головками с длиной расчетной части 100 мм и диаметром 10 мм помещали в нагревательную печь с установившейся температурой 150 °C установки для испытания на ползучесть ZWICK, выдерживали 3 ч для прогрева образца и нагружали растягивающим напряжением

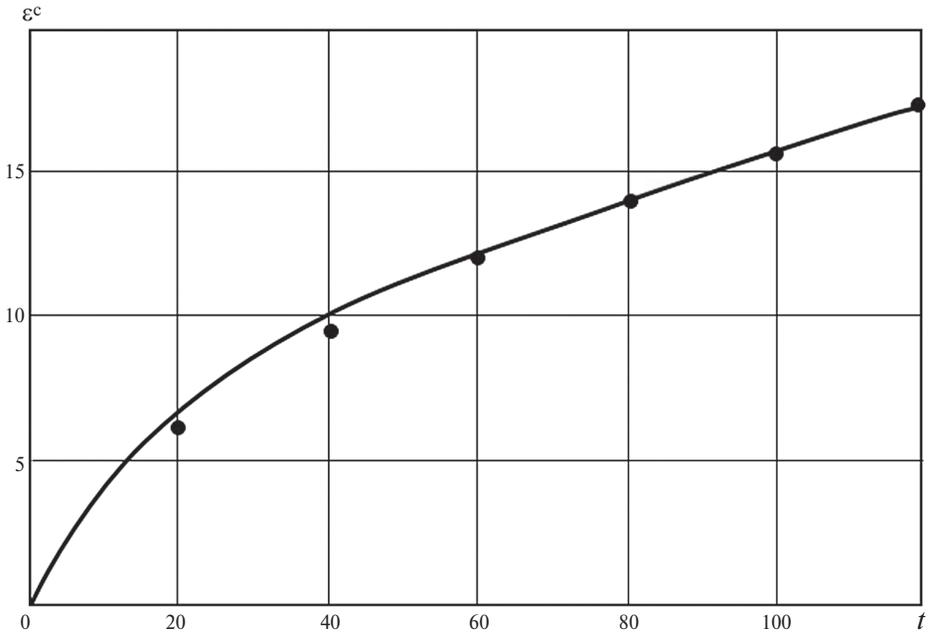


Рис. 1. Кривая ползучести сплава 1570P при $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и интенсивности напряжения $\sigma^c=130\text{ МПа}$ (точки – эксперимент, сплошная кривая – теоретическая).

интенсивностью $\sigma^c=130\text{ МПа}$. В процессе испытания фиксировали удлинение образца и время при постоянном значении интенсивности напряжения.

Итоговая кривая, полученная усреднением результатов испытаний четырех образцов, показана на рис. 1. Она имеет традиционный вид. Неустановившаяся стадия наблюдается в течение первых 40 ч. Далее следует установившаяся стадия.

4. Методика и результаты математического моделирования ползучести сплава 1570P в стационарных и нестационарных условиях термомеханического нагружения.

4.1. Основные зависимости и последовательность расчета кривых ползучести. Расчеты кривых ползучести проводили по зависимостям кинетической физико-математической теории ползучести металлов [3].

Мгновенная на произвольном расчетном шаге (g) интенсивность скорости деформации ползучести при одноосном растяжении образца при заданных σ^c и T определяется из уравнения

$$\dot{\varepsilon}_{(g)}^c = \nu_D b \sqrt{\rho_{s(g-1)}} \exp\left(-\frac{\beta(T)G(T)b^3 - \sigma_{(g)}^c b^2 / m \sqrt{\rho_{s(g-1)}}}{kT_{(g)}}\right), \quad (4.1)$$

где $\nu_D = 5 \cdot 10^{12}\text{ с}^{-1}$ (практически постоянная для всех металлов частота тепловых колебаний ионов в кристаллической решетке – частота Дебая);

$b = 3 \cdot 10^{-8}$ см – усредненный модуль вектора Бюргерса дислокаций в металлах; $g = 1, 2, \dots, n$ – номер расчетного шага нагружения; $G = 23\,400$ МПа – модуль сдвига материала при температуре $T = 150$ °С; $\rho_{s(g-1)}$ – скалярная плотность неподвижных дислокаций в материале на шаге нагружения $(g-1)$; $\beta = 0,7$ – эмпирический коэффициент, зависящий от температуры и деформации в выражении энергии активации самодиффузии $U = \beta G b^3 \sigma_{(g)}^c$ МПа – интенсивность напряжения при растяжении образца на расчетном шаге нагружения (g) ; $m = 3,1$ – фактор Тейлора; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T(g) = 423$ К – термодинамическая температура испытания на шаге нагружения (g) ; $kT = 584 \cdot 10^{-23}$ Дж.

На первом расчетном шаге ($g = 1$) скалярная плотность неподвижных дислокаций принимается равной исходной плотности в материале (до нагрева и деформации) $\rho_{s(1)} = \rho_{s(1-1)} = \rho_{s(0)}$ и определяется из уравнения

$$\rho_{s(0)} = \frac{(\sigma_{02}^{\text{exp}})^2}{(\beta m G b)^2}, \text{ см}^{-2}, \quad (4.2)$$

где σ_{02}^{exp} – экспериментально определенный предел текучести сплава при $T = 20$ °С.

В исследуемом сплаве 1570Р $\rho_{s(0)} = 2,9 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$.

Физическое кинетическое уравнение изменения действительного структурного параметра металла – скалярной плотности неподвижных дислокаций на шаге нагружения (g) имеет вид:

$$\Delta \rho_{s(g)} = \left[\frac{\dot{\varepsilon}_{(g)}}{b\lambda} - \rho_{s(g-1)}^{3/2} v_D b \exp \left(- \frac{\beta G b^3 - \sigma_{(g)}^c b^2 / m \sqrt{\rho_{s(g-1)}}}{kT_{(g)}} \right) \right] \Delta t_{(g)}, \quad (4.3)$$

где $\lambda = 10^{-3}$ см – средняя длина свободного (от источника до барьера) пробега подвижных дислокаций.

Приращение интенсивности деформации ползучести за время $\Delta t_{(g)}$ на шаге нагружения (g) равно:

$$\Delta \varepsilon_{(g)}^c = \dot{\varepsilon}_{(g)}^c \Delta t_{(g)}. \quad (4.4)$$

Интенсивность деформации ползучести, накопления за (g) шагов нагружения, найдется как

$$\varepsilon_{(g)}^c = \varepsilon_{(g-1)}^c + \Delta \varepsilon_{(g)}^c. \quad (4.5)$$

Время нахождения образца под нагрузкой за (g) расчетных шагов нагружения равно:

$$t_{(g)} = t_{(g-1)} + \Delta t_{(g)}. \quad (4.6)$$

Физико-математическая теория ползучести металлов с целью учета непрерывного изменения структуры металла в физическом процессе необратимой деформации разработана в конечных приращениях. Поэтому символ “ Δ ”,

стоящий перед расчетной величиной, обозначает конечное приращение величины. Например, $\Delta t_{(g)}$ – конечное приращение времени на шаге нагружения (g), в течение которого остаются постоянными интенсивности скорости деформации ползучести $\dot{\varepsilon}_{(g)}^c$, напряжения $\sigma_{(g)}^c$ и температура $T_{(g)}$, т.е. на расчетном шаге нагружения реализуется установившаяся (стационарная) ползучесть.

Далее, с учетом определенного по (4.3) $\Delta \rho_{s(g)}$ рассчитывается скалярная плотность неподвижных дислокаций накопленная за (g) расчетных шагов как

$$\rho_{s(g)} = \rho_{s(g-1)} + \Delta \rho_{s(g)}. \quad (4.7)$$

Определенное по (4.7) $\rho_{s(g)}$ подставляется в (4.1), и находится интенсивность скорости деформации на расчетном шаге ($g+1$) и расчетный цикл, включающий формулы (4.1), (4.4)–(4.7), повторяется.

За ($g=n$) расчетных циклов строится теоретическая кривая ползучести для конкретного материала. Если в какой-то момент времени $t_{(g)}$ режимы нагружения изменятся (из формулы (4.3) видно, что это могут быть $\sigma_{(g)}^c$ и $T_{(g)}$), в вышеприведенные формулы надо подставлять их новые значения.

4.2. Об определении средней длины свободного пробега подвижных дислокаций λ в металлах при необратимых деформациях. Средняя длина свободного пробега подвижных дислокаций, определяющих необратимую деформацию металлов, играет важную роль в физике пластических деформаций [3] и входит во многие физические уравнения, например $\varepsilon = \rho_g b \lambda$, где ρ_g – скалярная плотность подвижных дислокаций, b – модуль вектора Бюргерса дислокаций, λ – средняя длина свободного пробега подвижных дислокаций (от источника до Барьера) под действием приложенного напряжения.

Неподвижные дислокации (остановленные барьерами подвижные дислокации) оказывают барьерное действие на подвижные, поэтому является очевидной зависимость λ от скалярной плотности неподвижных дислокаций ρ_s .

В физико-математической теории дислокационной ползучести металлов выведен структурный закон установившейся ползучести в виде $b \rho_s \lambda = 1$ [3]. Установившаяся ползучесть протекает при постоянных значениях температуры, интенсивностей скорости необратимой деформации и напряжения. Это возможно только при неизменной структуре, о чем и свидетельствует структурный закон.

Так как $b = 3 \cdot 10^{-8}$ см = const в металлах, то из структурного закона непосредственно следует зависимость λ от ρ_s на стадии установившейся ползучести в виде $\lambda = 0.33 \cdot 10^8 / \rho_s$.

Физико-математическая теория дислокационной ползучести металлов разработана в малых, но конечных приращениях времени Δt , при этом Δt выбирается таким образом, чтобы на нем выполнялось условие постоянства температуры и интенсивностей $\dot{\varepsilon}^c$ и σ^c . Получается, что на каждом этапе $\Delta t_{(g)}$ допускается протекание стационарной ползучести. Следовательно, на каждый расчетный этап $\Delta t_{(g)}$ можно распространить зависимость между характеристиками дислокационной структуры, задаваемую структурным законом установившейся ползучести.

Исходная скалярная плотность неподвижных дислокаций в сплаве 1570Р $\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$ см⁻². Средняя длина свободного пробега

подвижных дислокаций на первом расчетном этапе ползучести ($g = 1$) будет равна $\lambda_{(1)} = 0.33 \cdot 10^8 / 2.9 \cdot 10^{10} = 0.1 \cdot 10^{-2} = 10^{-3}$ см.

4.3. *Замечание о выборе конечного интервала времени $\Delta t_{(g)}$.* Если рассчитывается на ползучесть деталь, которая при эксплуатации изделия подвергается нестационарной ползучести, то время эксплуатации разбивается на интервалы $\Delta t_{(g)}$, исходя из условий работы детали, в течение которых выполняется условие $\sigma_{(g)}^c, T_{(g)}, \dot{\varepsilon}_{(g)}^c = \text{const}$, т.е. на каждом расчетном шаге g принимается свой интервал $\Delta t_{(g)}$. Расчет заканчивается, когда $\varepsilon^c = \varepsilon_s^c$ – допустимая интенсивность деформации ползучести, заданная техническими условиями.

При расчете на ползучесть детали, претерпевающей стационарную ползучесть, рекомендуется следующая процедура выбора $\Delta t_{(g)}$. В этих условиях наблюдается две стадии ползучести – неустановившаяся стадия и стадия установившейся ползучести. Установившаяся ползучесть протекает в условиях $\sigma^c, \dot{\varepsilon}^c = \text{const}$ и здесь $\varepsilon_{(2)}^c = \dot{\varepsilon}_{(2)}^c \cdot \Delta t_{(2)}$ и потому вопрос о выборе $\Delta t_{(2)}$ не актуален. Выбрать $\Delta t_{(1)}$ для расчета неустановившейся стадии можно следующим образом.

Известно, что при установившейся ползучести выполняется структурный закон $b \cdot \lambda \cdot \rho_s^c = 1$. Из этого закона находим установившуюся скалярную плотность неподвижных дислокаций $\rho_s^c = 1/b\lambda$. Определяем разность $\rho_s^c - r_{s0}^c = \Delta \rho_{s(1)}$. Подставляем $\Delta \rho_{s(1)}$ в формулу (4.3) и из нее находим $\Delta t_{(1)}$, можно следующим образом.

4.4. *Математическое моделирование ползучести сплава в стационарных условиях нагружения.* Результаты математического моделирования ползучести сплава 1570P в стационарных условиях нагружения при $T = 150$ °C и $\sigma^c = 130$ МПа при пошаговом расчете с $\Delta t = 20$ ч на каждом шаге (g) приведены в табл. 1.

Теоретическая кривая ползучести показана на рис. 1 сплошной линией. Видно, что совпадение экспериментальной и теоретической кривых является идеальным.

Адекватное описание теорией экспериментальной кривой ползучести сплава 1570P в стационарных условиях нагружения является основанием для математического моделирования ползучести данного сплава в условиях нестационарного термомеханического нагружения.

Из физического кинетического уравнения изменения действительно структурного параметра металла – скалярной плотности неподвижных

Таблица 1. Результаты расчета кривой ползучести сплава 1570P ($\dot{\varepsilon}_{(g)}^c$, с^{-1} ; $\Delta \varepsilon_{(g)}^c$, %; $\varepsilon_{(g)}^c$, %; $\Delta \rho_{s(g)}$, см^{-2} ; $\rho_{s(g)}$, см^{-2})

g	$\dot{\varepsilon}_{(g)}^c$	$\Delta \varepsilon_{(g)}^c$	$\varepsilon_{(g)}^c$	$\Delta \rho_{s(g)}$	$\rho_{s(g)}$
0	0.0	0.0	0.0	0.0	$\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$
1	$9.9 \cdot 10^{-7}$	7.13	7.13	$0.03 \cdot 10^{10}$	$2.93 \cdot 10^{10}$
2	$3.04 \cdot 10^{-7}$	2.2	9.33	$0.65 \cdot 10^{10}$	$3.58 \cdot 10^{10}$
3	$3.04 \cdot 10^{-7}$	2.2	11.53	0.0	$3.58 \cdot 10^{10}$
4	$3.04 \cdot 10^{-7}$	2.2	13.73	0.0	$3.58 \cdot 10^{10}$
5	$3.04 \cdot 10^{-7}$	2.2	16.0	0.0	$3.58 \cdot 10^{10}$

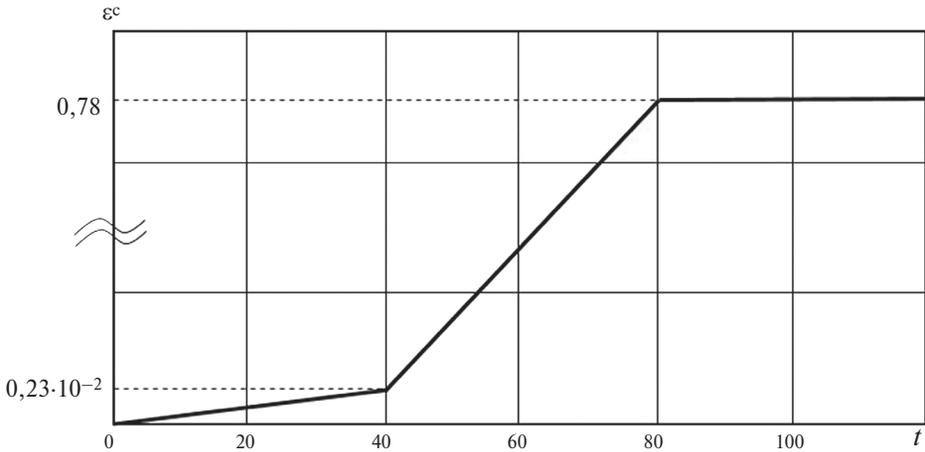


Рис. 2. Теоретическая кривая ползучести сплава 1570P при одноосном растяжении при температуре $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скачкообразном увеличении интенсивности напряжений с $\sigma_1=100\text{ МПа}$ на $\sigma_2=120\text{ МПа}$ и последующем уменьшении на $\sigma_3=\sigma_1=100\text{ МПа}$.

дислокаций (4.3) следует, что основными переменными, влияющими на $\Delta\rho_s$, являются напряжение σ^c и температура T . Поэтому при разработке программы математического моделирования ползучести основное внимание было уделено способности теории описывать ползучесть в условиях значительных изменений, в том числе скачкообразных, σ^c и T .

Программа математического моделирования приведена в табл. 2.

4.5. Математическое моделирование № 1 неустановившейся ползучести сплава 1570P. Значения постоянных и режимы нагружения принятые при моделировании № 1: $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$; $kT=584\cdot 10^{-23}\text{ Дж}$; $G^{150^{\circ}\text{C}}=23\,400\text{ МПа}$; $\rho_{s0}=2,9\cdot 10^{10}\text{ см}^{-2}$; $\beta=0,7$; $\lambda=10^{-3}\text{ см}$; $\sigma_1^c=100\text{ МПа}$; $\sigma_2^c=120\text{ МПа}$; $\sigma_3^c=\sigma_1^c=100\text{ МПа}$.

Результаты математического моделирования № 1 представлены в табл. 3.

Теоретическая кривая ползучести при одноосном растяжении сплава 1570P при температуре $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скачкообразном увеличении интенсивности напряжения с $\sigma_1=100\text{ МПа}$ на $\sigma_2=120\text{ МПа}$ и последующем уменьшении на $\sigma_3=\sigma_1=100\text{ МПа}$ показана на рис. 2.

В рамках физико-математической теории ползучести полученные результаты интерпретируются следующим образом.

При нагружении материала со скалярной плотностью неподвижных дислокаций $\rho_{s0}=2,9\cdot 10^{10}\text{ см}^{-2}$ при температуре $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ интенсивностью напряжения $\sigma_1^c=100\text{ МПа}$ процесс ползучести в соответствии с (4.1) протекает с интенсивностью скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{(1)}=1,6\cdot 10^{-10}\text{ с}^{-1}$. Эта скорость за 40 ч в соответствии с (4.4) обеспечивает приращение интенсивности деформации ползучести $\Delta\varepsilon_{(1)}^c=0,23\cdot 10^{-2}\%$. Интенсивность деформации ползучести в соответствии с (4.5) и с учетом, что $\varepsilon_{(g-1)}^c=\varepsilon_{(0)}^c=0$, будет равна $\varepsilon_{(1)}^c=0,23\cdot 10^{-2}\%$. За это время материал в соответствии с (4.3) получит приращение скалярной плотности неподвижных дислокаций $\Delta\rho_{s(1)}=7,0\cdot 10^5\text{ см}^{-2}$. Величина

Таблица 2. Программа математического моделирования ползучести сплава 1570P в условиях нестационарности термомеханического нагружения (Δt , ч – время действия, σ^c , МПа – напряжение), $\dot{\varepsilon}^c$, c^{-1} – интенсивность скорости деформации ползучести (определяется на каждом шаге нагружения (g) по уравнению (4.1))

Номер моделирования	Режимы нагружения		
№ 1	$T = 150 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const}$		
	$\sigma_1^c = 100$	$\sigma_2^c = 120$	$\sigma_3 = \sigma_1 = 100$
	$\Delta t_1 = 40$	$\Delta t_2 = 40$	$\Delta t_3 = 40$
№ 2	$\sigma_1^c = 120$	$\sigma_2^c = 100$	$\sigma_3 = \sigma_1 = 120$
	$\Delta t_1 = 40$	$\Delta t_2 = 40$	$\Delta t_3 = 40$
№ 3	$\sigma^c = 130 = \text{const}$		
	$T_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_3 = T_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$
	$\Delta t_1 = 40$	$\Delta t_2 = 40$	$\Delta t_3 = 40$
№ 4	$\sigma^c = 130 = \text{const}$		
	$T_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_3 = T_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$
	$\Delta t_1 = 40$	$\Delta t_2 = 40$	$\Delta t_3 = 40$

Таблица 3. Результаты моделирования № 1 ($\dot{\varepsilon}_{(g)}^c$, c^{-1} ; $\Delta\varepsilon_{(g)}^c$, %; $\varepsilon_{(g)}^c$, %; $\Delta\rho_{s(g)}^c$, cm^{-2} ; $\rho_{s(g)}$, cm^{-2} ; $\lambda_{(g)}$, см; $\Delta t_{(g)}$, ч)

g	$\dot{\varepsilon}_{(g)}^c$	$\Delta\varepsilon_{(g)}^c$	$\varepsilon_{(g)}^c$	$\Delta\rho_{s(g)}^c$	$\rho_{s(g)}$	$\lambda_{(g)}$	$\Delta t_{(g)}$
0	0.0	0.0	0.0	0.0	$\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$	10^{-3}	0.0
1	$1.6 \cdot 10^{-10}$	$0.23 \cdot 10^{-2}$	$0.23 \cdot 10^{-2}$	$7.0 \cdot 10^5$	$2.9 \cdot 10^{10}$	10^{-3}	40.0
2	$5.4 \cdot 10^{-8}$	0.78	0.78	$2.36 \cdot 10^8$	$2.92 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	40.0
3	$1.47 \cdot 10^{-10}$	$2.12 \cdot 10^{-3}$	0.78	$7.0 \cdot 10^5$	$2.92 \cdot 10^{10}$	10^{-3}	40.0

$\Delta\rho_{s(1)} = 7.0 \cdot 10^5 \ll \rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10} \text{ } cm^{-2}$, поэтому после завершения расчетного шага ($g = 1$) в материале в соответствие с (4.7) и с учетом, что $\rho_{(g-1)} = \rho_{s0}$, а $\Delta\rho_{s(1)}$ практически по сравнению с ρ_{s0} равно нулю, скалярная плотность неподвижных дислокаций будет $\rho_{s(1)} = \rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10} \text{ } cm^{-2}$.

Скачкообразное увеличение интенсивности напряжения с $\sigma_1^c = 100$ МПа до $\sigma_2^c = 120$ МПа на втором расчетном шаге нагружения ($g = 2$) без изменения температуры приводит к резкому увеличению интенсивности скорости ползучести с $\dot{\varepsilon}_{(1)} = 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ } c^{-1}$ до $\dot{\varepsilon}_{(2)} = 5.4 \cdot 10^{-8} \text{ } c^{-1}$. Эта скорость в соответствие с (4.4) за время $\Delta t_{(2)} = 40$ ч приводит к приращению интенсивности деформации ползучести $\Delta\varepsilon_{(2)}^c = 0.78\%$ (см. табл. 3 и рис. 2). Интенсивность скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{(2)}^c = 5.4 \cdot 10^{-8} \text{ } c^{-1}$ за 40 ч нагружения в соответствие с (4.3) дает приращение скалярной плотности неподвижных дислокаций $\Delta\rho_{s(2)} = 2.36 \cdot 10^8 \text{ } cm^{-2}$.

После завершения этапа 2 скалярная плотность неподвижных дислокаций равна $\rho_{s(2)} = 2.9 \cdot 10^{10} + 2.36 \cdot 10^8 = 2.92 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Скачкообразное уменьшение интенсивности напряжения на этапе ($g=3$) с 120 до 100 МПа обуславливает уменьшение интенсивности скорости ползучести с $\dot{\epsilon}_{(2)}^c = 5.4 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ до $\dot{\epsilon}_{(3)}^c = 1.47 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$.

На третьем расчетном шаге ($g=3$) интенсивность скорости ползучести материала $\dot{\epsilon}_{(3)}^c = 1.47 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ при скалярной плотности неподвижных дислокаций $\rho_{(3)}^c = \rho_{(2)}^c = 2.92 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, температуре $T=150 \text{ }^\circ\text{C}$ и интенсивности напряжения $\sigma_{(3)}^c = 100 \text{ МПа}$ за 40 ч нагружения согласно (4.3) дает приращение интенсивности деформации ползучести $\Delta\epsilon_{(3)}^c = 2.12 \cdot 10^{-3}\%$. Эта деформация по сравнению с $\epsilon_{(2)}^c = 0.78\%$ практически равна нулю. Получается, что на третьем расчетном шаге деформация ползучести практически отсутствует и сплав находится в упругом состоянии. Этот результат является неочевидным. Материал нагружен при той же температуре $T=150 \text{ }^\circ\text{C}$ интенсивностью напряжения $\sigma_{(3)}^c = 100 \text{ МПа}$, а необратимой деформации ползучести нет (точнее она очень мала $2.12 \cdot 10^{-3}\% \ll 0.78\%$).

Объяснение этого результата следует из формулы (4.1). Она показывает, что при одних и тех же значениях T и σ^c интенсивность скорости ползучести $\dot{\epsilon}^c$ тем меньше, чем больше скалярная плотность неподвижных дислокаций в металле, которые являются барьерами для подвижных дислокаций, движение которых и обуславливает необратимую деформацию [14]. Густая сетка неподвижных дислокаций с указанной плотностью “запирает” подвижные, и пластическая деформация прекращается. В исследуемом алюминиевом сплаве 1570Р скалярной плотности неподвижных дислокаций $\rho_s = 2.92 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ оказывается достаточно для прекращения ползучести при $T=150 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\sigma^c = 100 \text{ МПа}$.

Отметим, что в технике материаловеды и металлурги при создании жаропрочных сплавов берут сплав с определенным химическим составом и за счет определенной термической обработки формируют в нем высокую плотность дисперсных твердых интерметаллидных частиц, которые являются эффективными барьерами для подвижных дислокаций. Эти материалы сохраняют прочность при очень высоких температурах и напряжениях.

4.6. Математическое моделирование № 2 неустановившейся ползучести сплава 1570Р. Значения постоянных и режимы нагружения: $T=150 \text{ }^\circ\text{C}$; $kT = 584 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}$; $G^{150^\circ\text{C}} = 23400 \text{ МПа}$; $\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; $\beta = 0.7$; $\lambda = 10^{-3} \text{ см}$; $\sigma_1^c = 100 \text{ МПа}$; $\sigma_2^c = 100 \text{ МПа}$; $\sigma_3^c = \sigma_1^c = 120 \text{ МПа}$.

Таблица 4. Результаты моделирования № 2 ($\dot{\epsilon}_{(g)}^c$, с^{-1} ; $\Delta\epsilon_{(g)}^c$, $\%$; $\epsilon_{(g)}^c$, $\%$; $\Delta\rho_{s(g)}^c$, см^{-2} ; $\rho_{s(g)}$, см^{-2} ; $\lambda_{(g)}$, см ; $\Delta t_{(g)}$, ч)

g	$\dot{\epsilon}_{(g)}^c$	$\Delta\epsilon_{(g)}^c$	$\epsilon_{(g)}^c$	$\Delta\rho_{s(g)}^c$	$\rho_{s(g)}$	$\lambda_{(g)}$	$\Delta t_{(g)}$
0	0.0	0.0	0.0	0.0	$\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$	10^{-3}	0.0
1	$5.4 \cdot 10^{-8}$	0.78	0.78	$2.36 \cdot 10^8$	$2.92 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	40.0
2	$1.47 \cdot 10^{-10}$	$2.12 \cdot 10^{-3}$	0.78	$2.36 \cdot 10^6$	$2.92 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	40.0
3	$4.94 \cdot 10^{-8}$	0.71	1.49				40.0

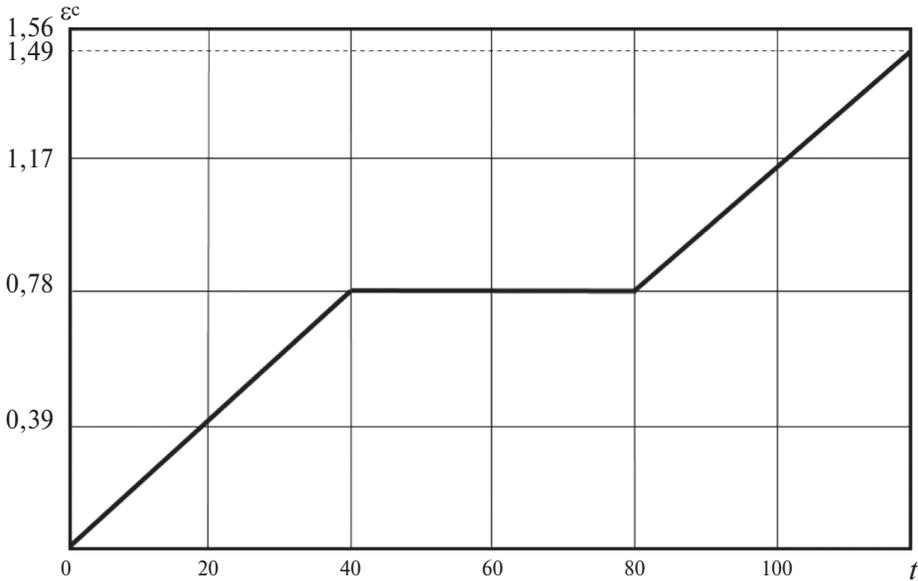


Рис. 3. Теоретическая кривая ползучести сплава 1570P при одноосном растяжении при температуре $T = 150$ °C и скачкообразном уменьшении интенсивности напряжений с $\sigma_1 = 120$ МПа на $\sigma_2 = 100$ МПа и последующем увеличении до $\sigma_3 = \sigma_1 = 120$ МПа.

Результаты математического моделирования № 2 представлены в табл. 4.

Теоретическая кривая ползучести при одноосном растяжении сплава 1570P при температуре: $T = 150$ °C и скачкообразном уменьшении интенсивности напряжений с $\sigma_1 = 120$ МПа на $\sigma_2 = 100$ МПа и последующем увеличении до $\sigma_3 = \sigma_1 = 120$ МПа приведена на рис. 3.

Из табл. 4 и рис. 3 следует, что на втором шаге ($g = 2$) нагружения при $\rho_{s0} = 2.92 \cdot 10^{10}$ см⁻² и $\sigma_2^c = 100$ МПа приращение $\Delta \varepsilon = 2.12 \times 10^{-3} \% \ll 0.78 \%$ и деформация ползучести практически отсутствует. При увеличении на шаге ($g = 3$) интенсивности напряжения до $\sigma_3^c = \sigma_1^c = 120$ МПа снова происходит рост деформации ползучести $\Delta \varepsilon^c = 1.49 \%$.

4.7. Математическое моделирование № 3 неустановившейся ползучести сплава 1570P. Значения постоянных и режимы нагружения: $\sigma^c = 130$ МПа = const; $G^{150^\circ\text{C}} = 23400$ МПа; $\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$ см⁻²; $\beta = 0.7$; $\lambda = 10^{-3}$ см; $T_1 = 120$ °C; $T_2 = 150$ °C; $T_3 = T_1 = 120$ °C; $kT_1 = 542.3 \cdot 10^{-23}$ Дж; $kT_2 = 584 \cdot 10^{-23}$ Дж; $kT_3 = 542.3 \cdot 10^{-23}$ Дж.

Результаты моделирования № 3 приведены в табл. 5.

Теоретическая кривая ползучести сплава 1570P при интенсивности напряжения $\sigma^c = 130$ МПа и $t = 120$ ч при скачкообразном увеличении температуры с $T_1 = 120$ °C на $T_2 = 150$ °C и последующим понижением на $T_3 = T_1 = 120$ °C показана на рис. 4. Физико-математическая теория ползучести позволяет интерпретировать кривую ползучести следующим образом.

В первые сорок часов нагружения из-за относительно невысокой температуры (120 °C) подвижность дислокаций небольшая и скорость необратимой

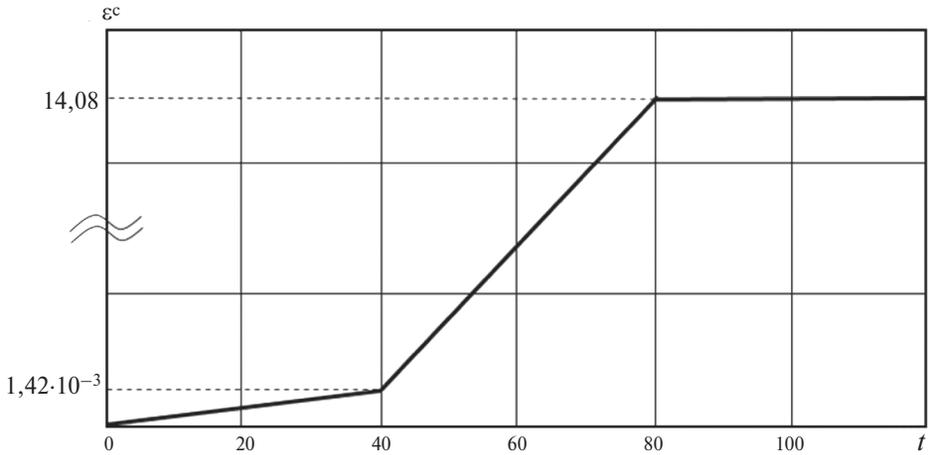


Рис. 4. Теоретическая кривая ползучести сплава 1570P при одноосном растяжении при интенсивности напряжений 130 МПа и скачкообразном увеличении температуры с $T_1 = 120^\circ\text{C}$ на $T_2 = 150^\circ\text{C}$ и уменьшении на $T_3 = T_1 = 120^\circ\text{C}$.

Таблица 5. Результаты моделирования № 3 ($\dot{\varepsilon}_{(g)}^c$, c^{-1} ; $\Delta\varepsilon_{(g)}^c$, %; $\varepsilon_{(g)}^c$, %; $\Delta\rho_{s(g)}^c$, см^{-2} ; $\rho_{s(g)}$, см^{-2} ; $\Delta t_{(g)}$, ч)

g	$\dot{\varepsilon}_{(g)}^c$	$\Delta\varepsilon_{(g)}^c$	$\varepsilon_{(g)}^c$	$\Delta\rho_{s(g)}^c$	$\rho_{s(g)}$	$\Delta t_{(g)}$
0	0.0	0.0	0.0	0.0	$\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$	0.0
1	$9.88 \cdot 10^{-11}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$	$7.51 \cdot 10^6$	$2.90 \cdot 10^{10}$	40.0
2	$9.78 \cdot 10^{-7}$	14.08	14.08	$0.34 \cdot 10^{10}$	$3.24 \cdot 10^{10}$	40.0
3	$1.16 \cdot 10^{-11}$	$1.67 \cdot 10^{-3}$	14.08	$3.53 \cdot 10^5$	$3.24 \cdot 10^{10}$	40.0

деформации при $\sigma^c = 130$ МПа и скалярной плотности неподвижных дислокаций $\rho_s = 2.9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ равна $\dot{\varepsilon}_{(1)}^c = 9.88 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$. Поэтому приращение пластической деформации согласно (4.4) и (4.5) небольшое и равно $\Delta\varepsilon_{(1)} = 1.42 \cdot 10^{-3}\%$. Повышение температуры до 150°C согласно (4.1) увеличивает скорость деформации до $\dot{\varepsilon}_{(2)}^c = 9.78 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, т.е. на четыре порядка (см. табл. 4). Это обуславливает значительное приращение за 40 ч деформации ползучести $\Delta\varepsilon_{(2)}^c = 14.08\%$, а также высокое значение приращения скалярной плотности неподвижных дислокаций согласно (4.3) $\Delta\rho_s = 0.34 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (см. табл. 5). Неподвижные дислокации при высокой плотности, как известно [14], блокируют подвижные дислокации, и дальнейшее приращение необратимой деформации возможно только при дальнейшем увеличении напряжения и температуры. Поэтому после 80 ч нагружения при постоянном напряжении 130 МПа и постоянной температуре $T = 120^\circ\text{C}$ приращение деформации ползучести $\Delta\varepsilon_{(3)}^c = 1.67 \cdot 10^{-4}\%$, т.е. практически равно нулю, и ползучесть на третьем шаге нагружения ($g = 3$) практически прекращается.

4.8. Математическое моделирование № 4 неустановившейся ползучести сплава 1570P. Значения постоянных и режимы нагружения: $\sigma^c = 130 \text{ МПа} = \text{const}$;

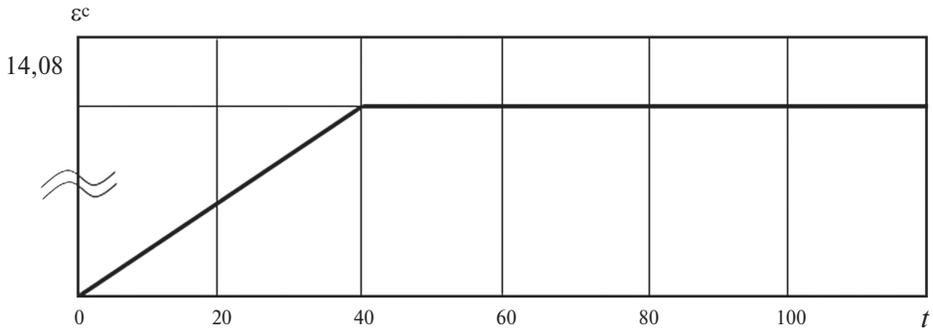


Рис. 5. Теоретическая кривая ползучести при одноосном растяжении сплава 1570P при интенсивности напряжений $\sigma^c = 130$ МПа и скачкообразном уменьшении температуры с $T_1 = 150$ °С до $T_1 = 120$ °С и последующем увеличении до $T_3 = 150$ °С.

Таблица 6. Результаты моделирования № 4 ($\dot{\epsilon}_{(g)}^c$, c^{-1} ; $\Delta\epsilon_{(g)}^c$, %; $\epsilon_{(g)}^c$, %; $\Delta\rho_{s(g)}^c$, cm^{-2} ; $\rho_{s(g)}$, cm^{-2} ; $\Delta t_{(g)}$, ч)

g	$\dot{\epsilon}_{(g)}^c$	$\Delta\epsilon_{(g)}^c$	$\epsilon_{(g)}^c$	$\Delta\rho_{s(g)}^c$	$\rho_{s(g)}$	$\Delta t_{(g)}$
0	0.0	0.0	0.0	0.0	$\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$	0.0
1	$9.78 \cdot 10^{-7}$	14.08	14.08	$0.34 \cdot 10^{10}$	$3.24 \cdot 10^{10}$	40.0
2	$1.16 \cdot 10^{-11}$	$1.67 \cdot 10^{-4} \approx 0$	14.08	$3.53 \cdot 10^5 \approx 0$	$3.24 \cdot 10^{10}$	40.0
3	$1.16 \cdot 10^{-11}$	0.0	14.08	0.0	$3.24 \cdot 10^{10}$	40.0

$T_1 = 150$ °С; $T_2 = 120$ °С; $T_3 = T_1 = 150$ °С; $kT_1 = 584 \cdot 10^{-23}$ Дж; $kT_2 = 542.3 \cdot 10^{-23}$ Дж; $\lambda = 10^{-3}$ см; $\beta = 0.7$; $G^{150^\circ C} = 23\,400$ МПа; $G^{120^\circ C} = 25\,200$ МПа; $\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$ cm^{-2} .

Результаты моделирования № 4 приведены в табл. 6.

Теоретическая кривая ползучести при одноосном растяжении сплава 1570P при интенсивности напряжений $\sigma^c = 130$ МПа и скачкообразном уменьшении температуры с $T_1 = 150$ °С на $T_2 = 120$ °С и последующим увеличении на $T_3 = T_1 = 150$ °С показана на рис. 5.

В рамках физико-математической теории дислокационной ползучести результаты математического моделирования № 4 интерпретируются следующим образом.

Согласно (4.1) нагружение интенсивностью $\sigma^c = 130$ МПа при $T_1 = 150$ °С и $\rho_{s0} = 2.9 \cdot 10^{10}$ cm^{-2} дает скорость ползучести $\dot{\epsilon}^c = 9.78 \cdot 10^{-7}$ c^{-1} . Эта скорость до 40 ч нагружения обеспечивает $\Delta\epsilon^c = 14.08\%$ и приращение скалярной плотности неподвижных дислокаций согласно (4.3) $\Delta\rho_{s(1)} = 0.31 \cdot 10^{10}$ cm^{-2} . В материале будет $\rho_s = \rho_{s0} + \rho_{s(1)} = 2.9 \times 10^{10}$ $cm^{-2} + 0.34 \times 10^{10}$ $cm^{-2} = 3.24 \times 10^{10}$ cm^{-2} .

На втором шаге нагружения ($g = 2$) при $T_2 = 120$ °С интенсивность скорости деформации согласно (4.1) будет $\dot{\epsilon}_{(2)}^c = 1.16 \cdot 10^{-11}$ c^{-1} (см. табл.6). Эта скорость за 40 ч нагружения на ($g = 2$) обеспечит $\Delta\epsilon_{(2)}^c = 1.67 \cdot 10^{-4}\%$, т.е. ползучесть из-за высокого значения $\rho_s = 3.24 \cdot 10^{10}$ cm^{-2} практически останавливается. Повышение температуры на шаге ($g = 3$) до $T_3 = T_1 = 150$ °С ситуацию не изменяет. Ползучесть отсутствует и на шаге ($g = 3$) (см. рис. 5).

5. Заключение. Полученные в работе результаты при математическом моделировании дислокационной ползучести алюминиевого сплава 1570P в условиях стационарного и нестационарного термомеханического нагружения позволяют сделать следующие выводы:

1) кинетическая физико-математическая теория дислокационной ползучести металлов описывает процесс в условиях стационарного и нестационарного термомеханического нагружения как при скачкообразном повышении интенсивностей напряжений и температуры, так и при скачкообразном уменьшении этих параметров нагружения и позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемым результатам;

2) теоретически предсказано существование неизвестного ранее явления прекращения (остановки) необратимой деформации дислокационной ползучести сплава 1570P при следующих значениях параметров нагружения и структуры: температура $T = 150$ °C, интенсивность напряжений $\sigma^c = 100$ МПа, скалярная плотность неподвижных дислокаций $\rho_s = 2.9 \cdot 10^{10}$ см⁻², средняя длина свободного пробега подвижных дислокаций $\lambda = 1.1 \cdot 10^{-3}$ см; температура $T = 150$ °C, $\sigma^c = 100$ МПа, $\rho_s = 2.92 \cdot 10^{10}$ см⁻², $\lambda = 1.1 \cdot 10^{-3}$ см; температура $T = 120$ °C, $\sigma^c = 130$ МПа, $\rho_s = 3.24 \cdot 10^{10}$ см⁻², $\lambda = 10^{-3}$ см;

3) физико-математическая теория дислокационной ползучести металлов раскрывает физическую природу явления. Она связана с торможением подвижных дислокаций густой сеткой неподвижных дислокаций. Так, например, интенсивность скорости ползучести в сплаве 1570P при температуре $T = 120$ °C и интенсивности напряжений $\sigma^c = 130$ МПа при скалярной плотности неподвижных дислокаций $\rho_s = 3.24 \cdot 10^{10}$ равна $\dot{\epsilon}^c = 1.16 \cdot 10^{-11}$ с⁻¹ (см. формулу (4.1)). Эта скорость в течение 80 ч нагружения дает пластическую деформацию ползучести величиной $\epsilon^c = \dot{\epsilon}^c \cdot \Delta t = 1.16 \cdot 10^{-11} (\text{с}^{-1}) \cdot 2.88 \cdot 10^5 (\text{с}) = 0.000334\%$, т.е. практически деформация отсутствует;

4) после экспериментального подтверждения явления его практическое значение будет очевидным – для увеличения ресурса работы деталей, претерпевающих при эксплуатации машин дислокационную ползучесть, необходимо в материале предварительно создать, например термомеханической обработкой (холодной и теплой пластической деформацией), достаточно высокую скалярную плотность неподвижных дислокаций, что практически остановит или уменьшит деформацию ползучести;

5) кинетическая физико-математическая теория дислокационной ползучести металлов является эффективным инструментом выполнения проекторочных расчетов при создании новой техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грешнов В.М. О физико-математической теории необратимых деформаций металлов // Изв. РАН. МТТ. 2011. №4. С. 62–74.
2. Грешнов В.М. Модель вязкопластического тела с учетом истории нагружения // Изв. РАН. МТТ. 2005. №2. С. 117–125.
3. Грешнов В.М. Физико-математическая теория больших необратимых деформаций металлов. М.: Физматлит, 2018. 232 с.

4. *Greshnov V.M.* Physico-mathematical theory of high irreversible strains in metals. CRC Press Taylor & Francis Group Boca Raton London New York. 2019. 242 p.
5. *Грешнов В.М., Патяева И.В., Сидоров В.Е.* Физико-математическая теория пластичности и ползучести металлов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2007. Т.9. № 6. С. 143–152.
6. *Грешнов В.М., Шайхутдинов Р.И., Пучкова И.В.* Кинетическая физико-феноменологическая модель длительной прочности металлов // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т.58. №1. С. 189–198.
<https://doi.org/10.15372/PMTF20170118>
7. *Грешнов В.М., Сафин Ф.Ф., Пучкова И.В.* Исследование процесса пластического структурообразования сплава 1570P (система Al-Mg-Sc) с использованием физико-математической теории пластичности металлов // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т.63. №4 С. 135–142.
<https://doi.org/10.15372/PMTF20220414>
8. *Грешнов В.М., Пучкова И.В., Сафин Ф.Ф.* Разработка технологии производства деталей повышенной прочности и герметичности из сплава 1570P для пневмо-гидроаппаратуры перспективных авиационных и ракетных двигателей. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2022. №10. С. 3–9.
9. *Локощенко А.М.* Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016. 502 с.
10. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
11. *Наместников В.С., Хвостунов А.А.* Ползучесть дуралюмина при постоянных и переменных нагрузках // Прикладная механика и техническая физика. 1960. №4. С. 90–95.
12. *Наместников В.С., Работнов Ю.Н.* О наследственных теориях ползучести // Прикладная механика и техническая физика. 1961. Т.2. №4. С.148–150.
13. *Ohno N., Murakami S., Ueno T.* A constitutive model of creep describing creep recovery and material softening caused by stress reversals // *J. Eng. Mater. Technol.* 1985.V. 107. № 1. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1115/1.3225766>
14. *Грешнов В.М., Шайхутдинов Р.И.* О кинетической физико-математической теории ползучести металлов, контролируемой термоактивированным скольжением дислокаций // Изв.РАН. МТТ. 2024. №2. С. 305–324.
<https://doi.org/10.31857/S1026351924020157>
15. *Наместников В.С.* Феноменологическая модель ползучести при переменных нагрузках // Прикладная механика и техническая физика. 1993. №4. С.123–127.
16. *Локощенко А.М., Фомин Л.В., Басалов Ю.Г., Агабабян В.С.* Моделирование ползучести металлов при нестационарном сложном напряженном состоянии // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия Физ.-мат. Науки. 2019. Т. 23. №1. С. 86–89.
<https://doi.org/10.14498/vsgtu1668>
17. *Локощенко А.М.* Моделирование длительной прочности металлов при нестационарном сложном напряженном состоянии // Прикладная математика и механика. 2018. Т. 82. Вып. 1. С. 84–97.

MATHEMATICAL MODELING OF CREEP OF ALUMINUM ALLOY 1570R (AL-MG-SC SYSTEM) USING KINETIC PHYSICAL-MATHEMATICAL THEORY OF METAL CREEP

V. M. Greshnov^{a, *}, I. V. Puchkova^{a, **}

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia
**E-mail: greshnov_vm@list.ru, **e-mail: puchkova_iv@mail.ru*

Abstract – In the work with the purpose of determining the prospects of using the kinetic physical and mathematical theory of creep of metals for performing design calculations when creating new technology products, the results obtained in describing the theory of uniaxial creep processes of 1570R alloy under conditions of steady-state and abrupt changes in thermomechanical loading parameters are presented. It is established that the new physical and mathematical theory of creep of metals being developed, which, unlike the classical phenomenological theory, takes into account the structure of the metal and its change in the creep process, equally well describes the process under steady-state and non-stationary conditions of thermomechanical loading. The important role of the structural state of the metal on the creep process is shown. The main structural parameter determining the characteristics of the process is the scalar density of immobile dislocations.

Keywords: metal creep, creep curve, loading history, structural parameter, physical kinetic equation

REFERENCES

1. *Greshnov V.M.* Physical-Mathematical Theory of Irreversible Strains in Metals // *Mech. Solids*. 2011. V. 46. № 4. P. 544–553.
<https://doi.org/10.3103/S0025654411040054>
2. *Greshnov V.M.* A model of a viscoplastic body taking into account the loading history // *Mech. Solids*. 2005. V. 40. №. 2. P. 97–103.
3. *Greshnov V.M.* Physico-mathematical theory of large irreversible deformations of metals. M.: Fizmatlit, 2018. 232 c.
4. *Greshnov V.M.* Physico-mathematical theory of high irreversible strains in metals. – CRC Press Taylor & Francis Group Boca Raton London New York. 2019. 242 p.
<https://doi.org/10.1201/9780429259791>
5. *Greshnov V.M., Patyaeva I.V., Sidorov V.E.* Physico-Mathematical Theory of Metal Plasticity and Creeping // *Vest. UGATU*. 2007. V. 9. № 6. P. 143–152.
6. *Greshnov V.M., Shaikhutdinov R.I., Puchkova I.V.* Kinetic physical phenomenological model of creep-rupture strength of metals // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017. V. 58. № 1. P. 165–172.
<https://doi.org/10.1134/S0021894417010187>
7. *Greshnov V.M., Safin F.F., Puchkova I.V.* Plastic structure formation of the 1570R alloy (Al–Mg–Sc) using the physico-mathematical theory of metal plasticity // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022. V. 63. P. 669–675.
<https://doi.org/10.1134/S0021894422040149>

8. *Greshnov V.M., Puchkova I.V., Safin F.F.* Development of technology for the production of parts of increased strength and tightness from 1570R alloy for pneumatic and hydraulic equipment of advanced aircraft and rocket engines // KSHP. OMD 2022. № 10. P. 3–9.
9. *Lokoshchenko A.M.* Creep and long-term strength of metals. M.: Fizmatlit, 2016.
10. *Rabotnov Yu.N.* Creep of structural elements. M.: Nauka, 1966.
11. *Namestnikov V.S., Khvostunov A.A.* Creep of duralumin under constant variable loads // Appl. Mech. Tech. Phys. 1960. № 4. P. 90–95.
12. *Namestnikov V.S., Rabotnov Yu.N.* On hereditary theories of creep // Appl. Mech. Tech. Phys. 1961. V. 2. № 4. P. 148.
13. *Ohno N., Murakami S., Ueno T.* A constitutive model of creep describing creep recovery and material softening caused by stress reversals. 1985.
14. *Greshnov V.M., Shaikhutdinov R.I.* On the kinetic physical and mathematical metal creep theory controlled by thermally activated dislocation sliding // Izvestiâ Akademii nauk. Rossijskaâ akademiâ nauk. Mehanikatverdogotela. 2024. № 2. P. 305–324.
<https://doi.org/10.31857/S1026351924020157>
15. *Namestnikov V.S.* A phenomenological model of creep under variable stress // PMTF. 1993. № 4. P. 123–127.
16. *Lokoshchenko A.M., Fomin L.V., Basalov Yu.G., Aghababyan V.S.* Modeling of metal creep under non-stationary complex stress state // Bulletin of Samara State Tech. University. Series Phys.-Math. Sciences. 2019. V. 23. № 1. P. 86–89.
17. *Lokoshchenko A.M.* Modeling of long-term strength of metals under non-stationary complex stress state // Applied Mathematics and Mechanics. 2018. V. 82. № 1. P. 84–97.