

Механика деформируемого твёрдого тела



УДК 539.372

Экспериментальные исследования высокотемпературной ползучести титанового сплава ВТ6 в условиях сложного напряженного состояния под воздействием агрессивной среды

© Л. А. Игумнов^{1,2}, Д. А. Казаков^{1,2}, Д. Н. Шишулин^{1,2},
И. А. Модин^{1,2}, Д. В. Жегалов²

¹ Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

² Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского,
Россия, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

Аннотация

Приводятся результаты экспериментальных исследований высокотемпературной ползучести и длительной прочности в условиях одноосного и сложного напряженно-деформированного состояния: одноосное растяжение, кручение и их совместное действие.

Испытания проведены на лабораторных трубчатых образцах из материала ВТ6 при температуре 600°C в состоянии поставки и в условиях воздействия агрессивной среды путем предварительного наводораживания лабораторных образцов с различной концентрацией водорода по массе C_m равной 0.15% и 0.3%.

Представлена экспериментальная информация для построения материальных параметров и скалярных функций модели термоползучести с изотропно-кинематическим упрочнением, полученная из базовых экспериментов по определению: начального радиуса поверхности ползучести

Научная статья

 Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Игумнов Л. А., Казаков Д. А., Шишулин Д. Н., Модин И. А., Жегалов Д. В. Экспериментальные исследования высокотемпературной ползучести титанового сплава ВТ6 в условиях сложного напряженного состояния под воздействием агрессивной среды // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2021. Т. 25, № 2. С. 286–302. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1850>.

Сведения об авторах

Леонид Александрович Игумнов  <https://orcid.org/0000-0003-3035-0119>
доктор физико-математических наук, профессор; ведущий научный сотрудник; каф. прикладной математики и информатики¹; главный научный сотрудник; лаб. моделирования физико-механических процессов²; e-mail: igumnov@mech.unn.ru

Дмитрий Александрович Казаков  <https://orcid.org/0000-0002-9316-4105>
кандидат технических наук; научный сотрудник; каф. прикладной математики и информатики¹; научный сотрудник; лаб. физико-механических испытаний материалов²;
e-mail: kazakov@mech.unn.ru

нулевого уровня (нулевая скорость ползучести); веера кривых ползучести при разных уровнях задаваемых напряжений с получением характеристик третьего участка на диаграмме ползучести, предшествующего разрушению образца при фиксированной температуре на заданном временном интервале; кривых ползучести при кручении до момента потери устойчивости в рабочей части образца. По результатам испытаний на одноосное нагружение выбрано два уровня интенсивности напряжений, при различном сочетании которых проведены эксперименты в условиях сложного нагружения.

Приводятся результаты экспериментальных исследований высокотемпературной ползучести и длительной прочности при нескольких различных программах изотермического нагружения в условиях сложного напряженно-деформированного состояния для образцов из сплава ВТ6 в состоянии поставки в условиях воздействия агрессивной среды. Полученная экспериментальная информация позволяет определить необходимые материальные параметры и провести верификацию используемой математической модели термоползучести.

Ключевые слова: наводораживание, нестационарная ползучесть, длительная прочность, повреждение, ресурс, базовый эксперимент, материальные параметры, сложное нагружение.

Получение: 10 марта 2021 г. / Исправление: 21 апреля 2021 г. /
Принятие: 11 мая 2021 г. / Публикация онлайн: 28 июня 2021 г.

Введение. Ресурс конструктивных элементов, работающих в условиях повышенных температур и механических воздействий, часто определяется физическими процессами накопления повреждений в результате процесса ползучести. Поскольку процессы накопления повреждений зависят от кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС), точность расчетных оценок прочности и ресурса элементов конструкций зависит от того, насколько используемые математические модели достоверно описывают процессы деформирования и повреждения материала в опасных зонах элементов конструкции в результате процесса высокотемпературной ползучести и насколько точно определены вещественные параметры материала, входящие в используемую математическую модель [1–11]. Особое внимание необходимо уделять экспериментальным исследованиям процессов высокотемпературной ползучести при многоосном нагружении, так как именно эта экспериментальная информация позволяет строить достоверную математическую модель по

Денис Николаевич Шишулин  <https://orcid.org/0000-0002-6527-557X>

кандидат физико-математических наук; научный сотрудник; каф. прикладной математики и информатики¹; научный сотрудник; лаб. физико-механических испытаний материалов²; e-mail: shishulindn@gmail.com

Иван Александрович Модин  <https://orcid.org/0000-0002-3561-4606>

кандидат физико-математических наук; научный сотрудник; каф. прикладной математики и информатики¹; научный сотрудник; лаб. моделирования физико-механических процессов²; e-mail: mianet@mail.ru

Дмитрий Владимирович Жегалов  <https://orcid.org/0000-0002-7282-598X>

кандидат технических наук; старший научный сотрудник; лаб. проблем прочности, динамики и ресурса²; e-mail: zhegalov@mech.unn.ru

учету эффектов, возникающих при сложных непропорциональных нагружениях и определяющих точность расчетов длительной прочности конструкций.

Возможности испытательного оборудования [12–15] с интегрированным математическим обеспечением позволяют создать различные программы испытаний лабораторных образцов соответствующей геометрии: одноосное растяжение–сжатие, кручение, нагружение по лучевым траекториям с изломом, по лучевым пространственным траекториям в широком диапазоне изменения скоростей деформирования и температуры.

Экспериментальные исследования одноосного и многоосного напряженных состояний в условиях высокотемпературной ползучести и длительной прочности проводились на титановом сплаве ВТ6 при температуре 600°C на лабораторных тонкостенных трубчатых образцах. Часть испытаний проводилась на материале в состоянии поставки. Для исследования влияния водородной коррозии на механические характеристики титанового сплава ВТ6 при указанных условиях нагружения часть образцов была подвергнута влиянию агрессивной среды (наводороживанию при концентрациях водорода по массе 0.15 % и 0.3 %).

1. Экспериментальная информация для получения вещественных параметров модели термползучести. Проведены эксперименты для материала ВТ6 по программе получения вещественных параметров для модели термползучести с комбинированным упрочнением [16–19]. Определены начальные радиусы поверхности ползучести, соответствующие нулевой скорости ползучести. Для уровней интенсивности напряжений σ_u , равных 50, 66, 78, 90 МПа, построен веер кривых ползучести с получением характеристик третьего участка на диаграмме ползучести, предшествующего разрушению образца, и кривые ползучести при кручении до момента потери устойчивости в рабочей части образца при температуре $T = 600^{\circ}\text{C}$ на временном интервале $t = 10 \div 20$ ч.

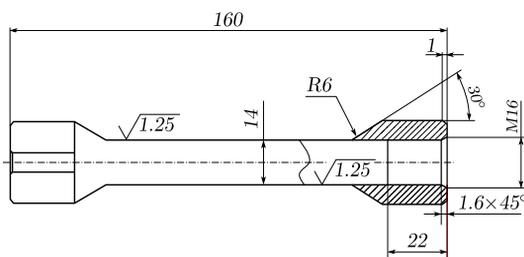


Рис. 1. Схема лабораторного образца (в мм)
[Figure 1. The Laboratory Sample (in mm)]

Эксперименты были проведены на лабораторных образцах (рис. 1), имеющих форму тонкостенной трубы с размерами рабочей части: наружный диаметр — 16 мм, толщина стенки — 1 мм, длина — 105 мм. Образцы испытывались в состоянии поставки и в условиях, имитирующих воздействие агрессивной среды — предварительного наводороживания при концентрациях водорода по массе — 0.15 % и 0.3 %. Выбор агрессивной среды связан с тем, что в условиях эксплуатации инженерных объектов из титановых сплавов при высоких температурах, несмотря на то, что данные сплавы обладают высо-

кой стойкостью ко многим агрессивным средам, наводороживание во многих конструктивных элементах энергетического оборудования и систем является причиной интенсивно протекающих деградиционных механизмов, вызванных «водородным охрупчиванием», которое приводит к труднопрогнозируемым разрушениям конструкций, выполненных из этих материалов.

Наводороживание проводилось в газовой среде диффузионным способом (метод Сиверта). Технология наводороживания состояла из следующих этапов: обеспечение вакуума и необходимой температуры, подача водорода, временная выдержка в данных условиях до достижения требуемой концентрации и отжига для выравнивания концентрации по длине и объему рабочей части образца. Выполненное измерение концентрации водорода атомно-эмиссионным спектральным методом анализа в приповерхностных слоях рабочей части лабораторных образцов показало разброс для образцов при выбранном уровне наводороживания $0.3 \pm 0.04\%$. Химический состав сплава ВТ6 в состоянии поставки приведен в табл. 1. Сплав относится к двухфазным ($\alpha + \beta$) мартенситного класса с небольшим количеством β -фазы.

Таблица 1

Химический состав сплава ВТ6 в состоянии поставки (в %)
[Chemical composition of titanium alloy VT6 (Ti-6Al-4V), per %]

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Others
< 0.6	< 0.1	< 0.1	3.5–5.3	< 0.05	86.45–90.9	5.3–6.8	< 0.3	< 0.2	< 0.015	< 0.3

Испытания лабораторных образцов выполнялись на универсальном испытательном комплексе Z100 ZWICK-ROEL (рис. 2), который позволяет проводить эксперименты на сложное многосное нагружение в квазистатическом диапазоне скоростей деформаций на трубчатых образцах при синхронизированном по времени задании следующих параметров:

- скорость изменения продольной силы, скорость изменения крутящего момента на активном захвате, скорость изменения внутреннего давления в образце (режимы «мягкого» нагружения),



Рис. 2. Общий вид испытательной машины Z100 ZWICK-ROEL
 [Figure 2. General view of the Z100 ZWICK-ROEL testing machine]

- скорость перемещения (деформации на рабочей части образца) и угла закручивания активного захвата (режимы «жесткого» нагружения).

Максимальные значения воспроизводимых параметров испытаний — по силе ± 100 кН и по крутящему моменту 1000 Нм, по внутреннему давлению $0 \div 48$ МПа. Измерительная аппаратура универсального экспериментального комплекса состоит из следующих элементов:

- лазерного экстензометра laserXtens, позволяющий одновременно измерять как продольные деформации (база измерения от 20 до 100 мм) с разрешающей способностью ≤ 1 мкм, так и деформации при кручении (углы поворота реперных точек в рабочей части образцов), класс точности 1 по ISO 9513;
- измерителя поперечных деформаций на базе видеоэкстензометра ME46 с разрешающей способностью от 0.4 до 2 мкм;
- датчика силы и крутящего момента с классом точности 1 по ISO 7500-1.

Экспериментальная установка снабжена термокамерой модели ЕС 2181 с контроллером, позволяющая проводить испытания образцов различной формы в диапазоне температур от минус 150 до плюс 600 °С. Термокамера обеспечивает равномерное распределение поля температуры в рабочей части образцов с погрешностью менее $\pm 1^\circ\text{C}$.

Для экспериментальных исследований была разработана программная база проведения испытаний на многоосную ползучесть с учетом основных требуемых условий:

- изменение нагружающих параметров при управлении испытаниями с безударными переходами с одного режима нагружения на другой;
- жесткое беззачерное закрепление захватных частей образцов в захваты нагружающего устройства;
- обеспечение вынужденной конвекцией в термокамере равномерного распределения температуры и ее контроль на рабочей части образца.

Экспериментальные исследования процессов ползучести титанового сплава ВТ6 проводились по схеме «мягкого» нагружения (задающие параметры испытаний — сила и крутящий момент) и температуре 600 °С. Температура окружающего воздуха при проведении испытаний составляла 20 ± 5 °С. Испытания проводились до момента разрушения образца при растяжении либо до момента потери устойчивости при кручении.

Проводимые исследования характеризовались:

- по виду испытаний — определительные;
- по продолжительности проведения и степени интенсификации процессов — нормальные;
- по виду воздействия — механические и температурные;
- по результатам воздействия — разрушающие.

Графический материал, представленный в работе, имеет следующее соответствие:

- сплошными линиями изображается информация, относящаяся к испытаниям материала в состоянии поставки;
- штрих-пунктирными — в состоянии наводороженного при концентрациях водорода по массе 0.15 %;
- штриховыми линиями — в состоянии наводороженного при концентрациях водорода по массе 0.3 %.

В случае одноосного нагружения представлены следующие результаты испытаний.

1. Определение значений радиуса поверхности ползучести, соответствующего нулевой скорости ползучести, когда действующее напряжение вызывает деформацию ползучести, не превышающую значений $0.1 \div 0.2\%$ за принятый временной интервал. В табл. 2 приведены экспериментально определенные значения уровней напряжений, при которых за базовое время 10–20 ч деформация ползучести составила не более $0.1 \div 0.2\%$ (допуск на остаточную деформацию ползучести) для температуры испытаний 600°C . Значения указанных напряжений получены для материала с различной степенью наводороживания по массе C_m . Результаты являются исходной экспериментальной информацией для расчета соответствующих значений начальных радиусов поверхностей ползучести сплава.

Таблица 2
Начальный радиус поверхности ползучести
[Initial radius of the creep surface]

$C_m, \%$	0	0.15	0.3
σ_{11}, MPa	25	17.5	15

2. Ползучесть при кручении с интенсивностями действующих напряжений σ_u , равными 50 и 66 МПа, для сплава в состоянии поставки и с предварительно внедренным водородом с концентрацией по массе 0.3% до момента потери устойчивости образцов (рис. 3).
3. Ползучесть при одноосном растяжении с интенсивностями действующих напряжений σ_u , равными 30, 50, 66, 78 и 90 МПа, для сплава в состоянии поставки и с предварительно внедренным водородом с концен-

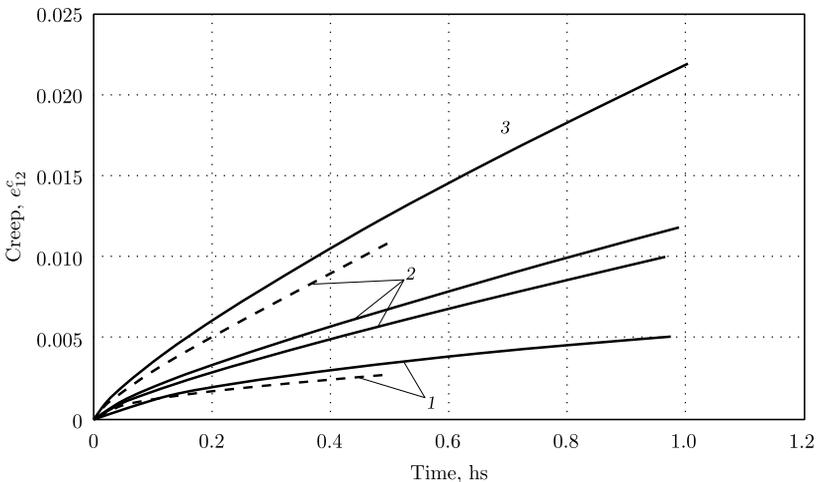


Рис. 3. Ползучесть при кручении для заданных уровней интенсивности напряжений: 1 – $\sigma_u = 50$ МПа, 2 – $\sigma_u = 66$ МПа, 3 – $\sigma_u = 78$ МПа

[Figure 3. Torsional creep at given stress intensity levels: 1 – $\sigma_u = 50$ МПа, 2 – $\sigma_u = 66$ МПа, 3 – $\sigma_u = 78$ МПа; solid lines – the alloy at delivery condition, dashed lines – the hydrogenated alloy with the hydrogen-ion concentration by weight of 0.3%]

трацией по массе 0.3% с получением третьего участка диаграмм ползучести (рис. 4).

4. На рис. 5 графически представлены этапы нагружения образца: реализация процесса ползучести при кручении с одновременным поддержанием нулевого значения растягивающего напряжения (чистое кручение), где под номером 1 указан вектор действующего напряжения $\sigma_{u(1)} = 50$ МПа, под номером 2 — вектор при разгрузке напряжения; реализация процесса ползучести при растяжении — вектор нагрузки $\sigma_{u(2)} = 78$ МПа под номером 3. Значения деформаций ползучести, полученных при реализации описанной истории нагружения, изображены на рис. 6 для одноосного кручения и на рис. 7 для растяжения соответственно. Результаты серии испытаний представляют информацию для

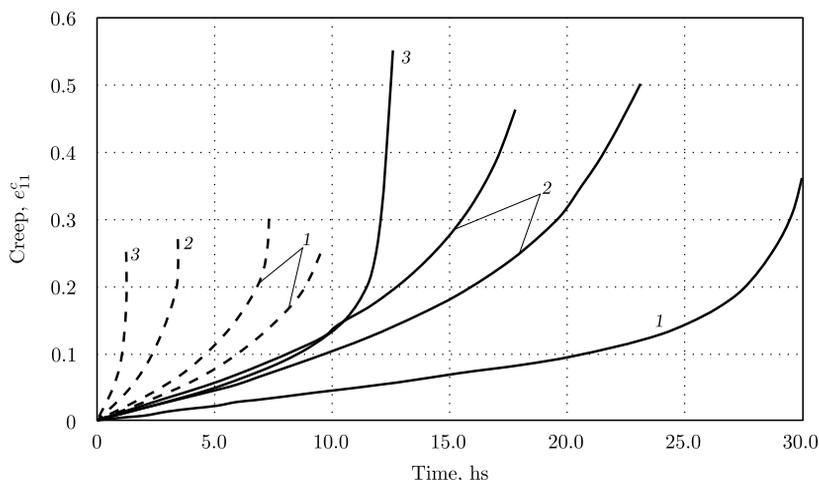


Рис. 4. Ползучесть при кручении для заданных уровней интенсивности напряжений: 1 — $\sigma_u = 66$ МПа, 2 — $\sigma_u = 78$ МПа, 3 — $\sigma_u = 90$ МПа

[Figure 4. Torsional creep at given stress intensity levels: 1 — $\sigma_u = 66$ МПа, 2 — $\sigma_u = 78$ МПа, 3 — $\sigma_u = 90$ МПа; solid lines — the alloy at delivery condition, dashed lines — the hydrogenated alloy with the hydrogen-ion concentration by weight of 0.3%]

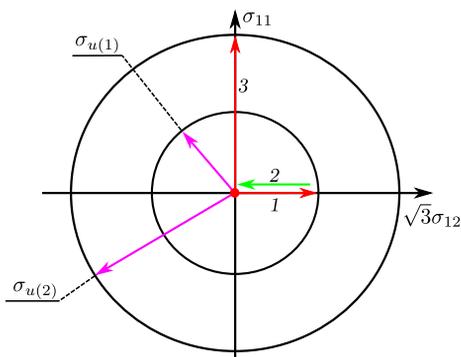


Рис. 5. Этапы нагружения образца при одноосном кручении с переходом к одноосному растяжению

[Figure 5. Stages of the uniaxial torsion loading with the transition to the uniaxial tension]

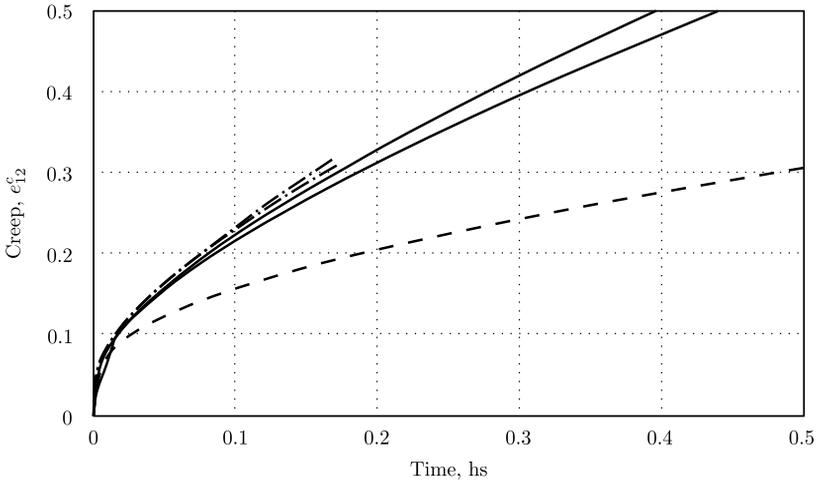


Рис. 6. Ползучесть при кручении (режим 1, $\sigma_{u(1)} = 50$ МПа, $\sigma_{11} = 0$)
 [Figure 6. Torsional creep (1st mode, $\sigma_{u(1)} = 50$ МПа, $\sigma_{11} = 0$): solid lines — the alloy at delivery condition, dash-dotted lines — the hydrogenated alloy with the hydrogen-ion concentration by weight of 0.15%, dashed line — the hydrogenated alloy with the hydrogen-ion concentration by weight of 0.3%]

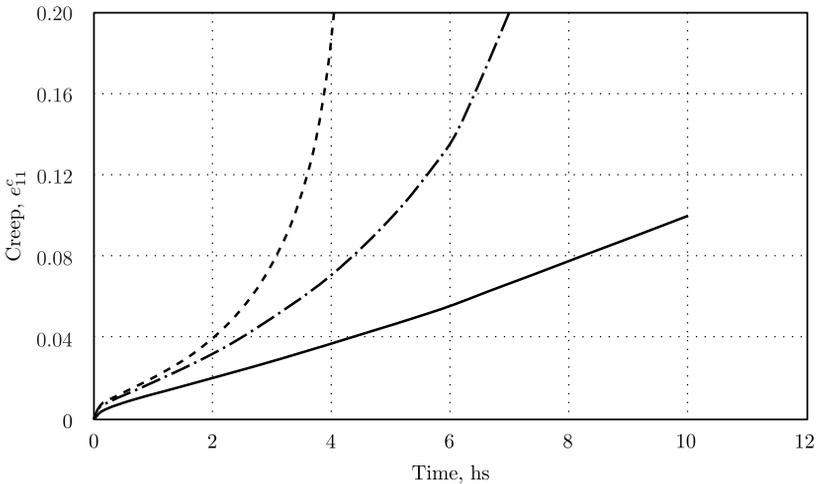


Рис. 7. Ползучесть при одноосном растяжении (режим 3, $\sigma_{u(2)} = 78$ МПа)

[Figure 7. Uniaxial tensile creep (3rd mode, $\sigma_{u(2)} = 78$ МПа): solid line — the alloy at delivery condition, dash-dotted line — the hydrogenated alloy with the hydrogen-ion concentration by weight of 0.15%, dashed line — the hydrogenated alloy with the hydrogen-ion concentration by weight of 0.3%]

оценки влияния агрессивной среды и уточнения вещественных параметров используемой модели термоползучести для материала в состоянии поставки и с предварительно внедренным водородом с концентрацией по массе 0.15% и 0.3%, а также влияния предварительно накопленной деформации ползучести в условиях нагружения при кручении на последующую деформацию ползучести и процесс накопления повреждений при растяжении.

На основании полученной экспериментальной информации при одноосных режимах кручения и растяжения выбраны два уровня интенсивности напряжений $\sigma_{u1} = 50$ МПа и $\sigma_{u2} = 78$ МПа, при которых проводятся дальнейшие эксперименты при ползучести в условиях комбинированного нагружения при одновременном растяжении и кручении, а также при их ступенчатом изменении в условиях сложного нагружения.

2. Испытания в условиях многоосного нагружения на ползучесть и длительную прочность. При испытаниях в условиях многоосного нагружения интенсивность тензора напряжений определялась как $\sigma_u = |\bar{\sigma}| = (\sigma_{11}^2 + 3\sigma_{12}^2)^{1/2}$.

Для многоосного нагружения было выбрано два режима. Первый режим реализовывался следующим образом: ползучесть при совместном растяжении и кручении для двух выбранных уровней интенсивности напряжений $\sigma_{u(1)}$, $\sigma_{u(2)}$ при кусочно-линейном задании траектории нагружения. Задаваемые углы векторов действующих напряжений между осями σ_{11} и $\sqrt{3}\sigma_{12}$ равны 30° и 60° соответственно (рис. 8).

На рис. 8 графически представлены этапы испытаний на многоосную ползучесть, где под номером 1 указан вектор напряжения $\sigma_{u(1)} = 50$ МПа, действующий на первом этапе нагружения (угол 30°), под номером 2 — вектор напряжения $\sigma_{u(2)} = 78$ МПа, действующий на втором этапе (угол 60°), вектор под номером 3 обозначает переход между уровнями интенсивности напряжения в испытаниях. Для оценки влияния агрессивной среды на свойства материала при нестационарных условиях деформирования по указанной истории нагружения проведены эксперименты для материала в состоянии поставки с тремя повторами и с предварительно внедренным водородом с концентрацией 0.15 % и 0.3 % (два повтора). Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 9.

Второй режим реализовывался следующим образом: ползучесть при кручении, совместном растяжении–кручении, растяжении по лучевым путям нагружения с направлением действующего напряжения $\sigma_{u(1)} = 50$ МПа в пространстве напряжений $\sigma_{11}-\sqrt{3}\sigma_{12}$ под углами, равными 0° , 30° , 60° и 90° .

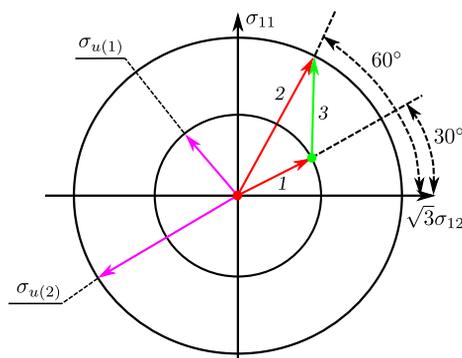


Рис. 8. История первого режима комбинированного нагружения

[Figure 8. Stages of the first combined loading mode]

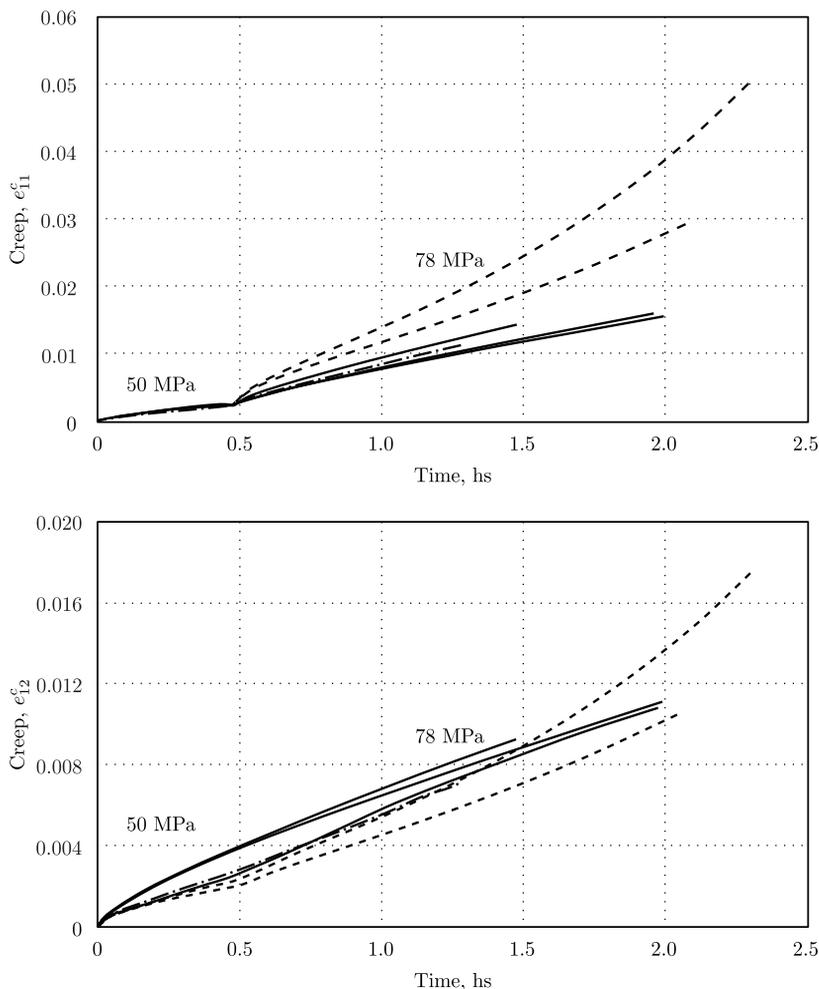


Рис. 9. Деформация ползучести при комбинированном нагружении [Figure 9. Creep under combined loading: solid lines — the alloy at delivery condition, dash-dotted lines — the hydrogenated alloy with the hydrogen-ion concentration by weight of 0.15 %, dashed lines — the hydrogenated alloy with the hydrogen-ion concentration by weight of 0.3 %]

На рис. 10 графически представлены этапы лучевых нагружений, где цифрами 1, 3, 5 и 7 обозначены векторы действующего напряжения при нагружении образца, цифрами 2, 4, 6 — векторы разгрузки. При смене угла вектора действующих напряжений (непропорциональное нагружение) существенной особенностью является неколлинеарность векторов напряжений и скоростей деформаций ползучести. Характер изменения деформаций ползучести, полученных при реализации указанной истории нагружения, приведен на рис. 11. На рис. 12 приведена траектория деформирования при ползучести при лучевом нагружении.

При изменении угла вектора напряжения для лучевых нагружений наблюдается временное увеличение скоростей осевой и сдвиговой деформации ползучести. Это переходное увеличение скорости деформаций уменьшается по мере увеличения продолжительности времени нагружения, а также вектор

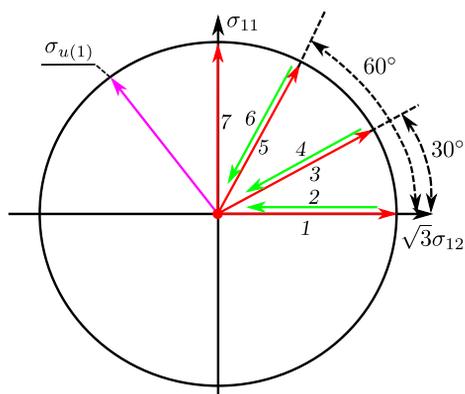


Рис. 10. История второго режима нагружения
 [Figure 10. Stages of the second loading mode]

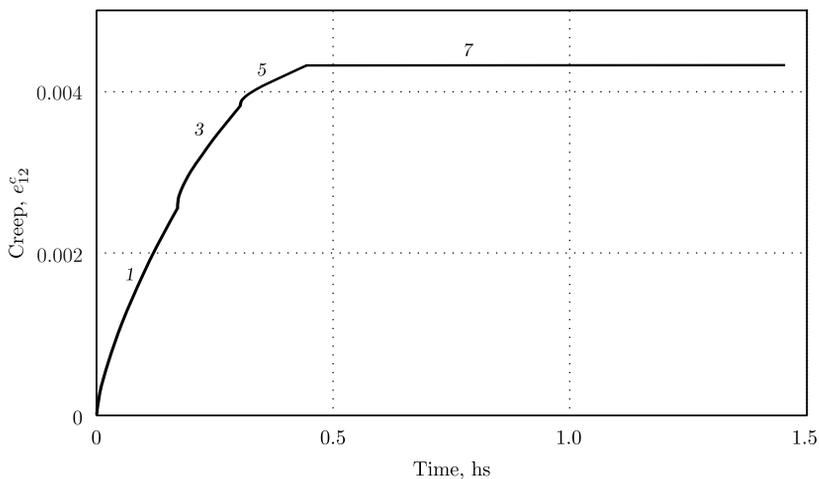
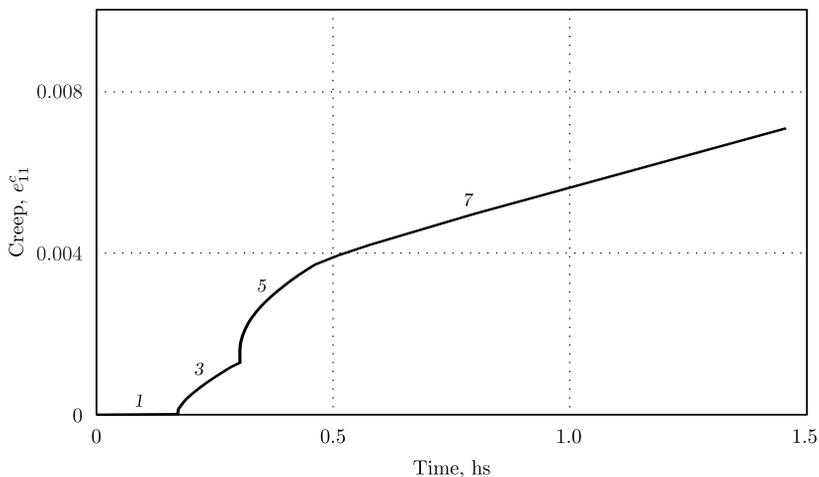


Рис. 11. Деформация ползучести при растяжении в условиях лучевых нагружений
 [Figure 11. Tensile creep under conditions of the second loading mode]

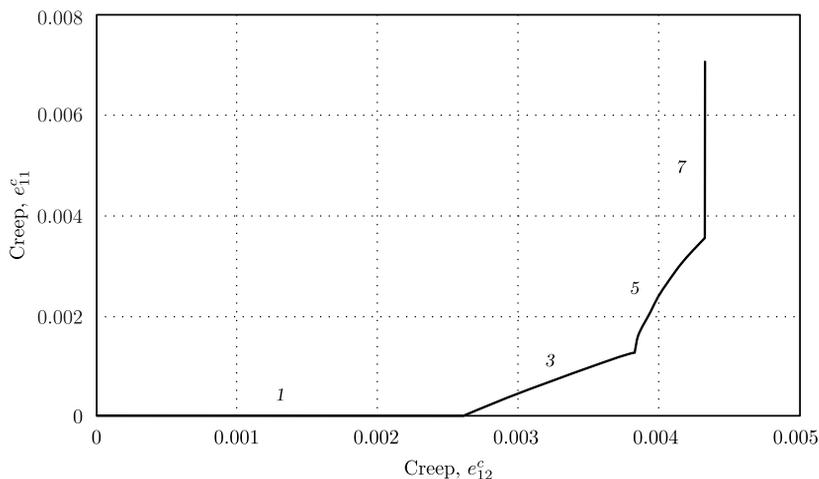


Рис. 12. Траектория деформирования при ползучести в условиях лучевых нагрузений [Figure 12. Creep deformation trajectory under conditions of the second loading mode]

скорости деформаций ползучести $\bar{\epsilon}^c$ становится неколлинеарным вектору напряжений $\bar{\sigma}$ сразу же после угла вектора напряжения. Однако эта неколлинеарность имеет тенденцию к постепенному исчезновению по мере протекания процесса ползучести.

Дополнительно для лабораторных образцов после проведенных испытаний были выполнены металлографические исследования, которые показали, что наводороживание приводит к образованию гидридной составляющей сплава ВТ6 и увеличению микротвердости, что связано с повышением сжимающих микронапряжений в структуре сплава. Процесс образования гидридов титана начинается после превышения предела растворимости водорода в титановом сплаве. При увеличении содержания водорода от 0 до 0.3% гидриды титана выпадают в структуре в виде выделений произвольной формы и образуют по границам зерен сплошную сетку. Также происходит увеличение доли β -фазы в результате фазового превращения $\alpha \rightarrow \beta$. Характерной особенностью указанной структуры является то, что материал значительно снижает пластические свойства при температуре 600°C, что подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями процессов ползучести и, как следствие, приводит к снижению ресурсных характеристик материала в этих условиях.

Анализ результатов испытаний на ползучесть в условиях одноосного и многоосного нагружения лабораторных образцов сплава ВТ6 в исходном и наводороженном состоянии позволяет сделать вывод, что наводороженные образцы имеют тенденцию к уменьшению начальной скорости ползучести на начальном участке деформирования (см. рис. 6). Данный факт связан с образованием практически не деформируемой гидридной фазы и увеличением микротвердости сплава, однако при увеличении длины пути деформирования при ползучести скорость деформации ползучести начинает превосходить соответствующую скорость на образцах в состоянии поставки, что связано с дополнительным активным накоплением дефектов на границах фаз (α и β).

Заключение. Проведено экспериментальное исследование поведения металлических трубчатых образцов из материала ВТ6 при различных режимах нагружения. По результатам проведенных испытаний получены: исходная экспериментальная информация для получения материальных параметров и скалярных функций математической модели многоосной ползучести с учетом влияния агрессивной среды (наводораживания); зависимости изменения компонент тензора деформаций ползучести и времени до разрушения для указанных выше законов нагружения с учетом влияния агрессивной среды (наводораживания).

Полученная экспериментальная информация при многоосной ползучести сплава ВТ6 в условиях поставки и с учетом предварительного наводораживания в совокупности с металлографическими исследованиями позволяет обосновать возможность верификации математической модели термовязкопластичности с комбинированным упрочнением и входящих в ее состав материальных параметров для определенного класса траекторий нагружения с учетом влияния агрессивной среды на механические характеристики материала.

Конкурирующие интересы. Заявляем, что в отношении авторства и публикации этой статьи конфликта интересов не имеем.

Авторский вклад и ответственность. Л.А. Игумнов — визуализация и верификация результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. Д.А. Казаков — идея исследования, формулировка целей и задач исследования, визуализация и верификация результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. Д.Н. Шишулин — определение химического состава материала, визуализация и верификация результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. И.А. Модин — проведение экспериментальных исследований, визуализация и верификация результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. Д.В. Жегалов — проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной рукописи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ 19–19–00062, Самарский государственный технический университет).

Библиографический список

1. Волков И. А., Игумнов Л. А., Казаков Д. А., Шишулин Д. Н., Тарасов И. С. Уравнения состояния нестационарной ползучести при сложном нагружении // *ПМТФ*, 2018. № 3. С. 191–202. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180320>.
2. Волков И. А., Игумнов Л. А., Тарасов И. С., Шишулин Д. Н., Сметанин И. В. Оценка длительной прочности элементов конструкций при термомеханическом нагружении // *Проблемы прочности и пластичности*, 2018. Т. 80, № 4. С. 495–512. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-4-494-512>.
3. Локощенко А. М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
4. Волков И. А., Игумнов Л. А., Казаков Д. А., Миронов А. А., Тарасов И. С., Шишулин Д. Н., Сметанин И. В. Модель поврежденной среды для описания длительной прочности конструкционных материалов (металлов и их сплавов) // *Проблемы*

- прочности и пластичности, 2017. Т. 79, №3. С. 285–300. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-3-285-300>.
5. Бондарь В. С., Абашев Д. Р., Петров В. К. Сравнительный анализ вариантов теорий пластичности при циклических нагрузениях // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2017. №2. С. 23–44. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.2.02>.
 6. Ohashi Y., Kawai M., Kaito T. Inelastic behavior of type 316 stainless steel under multiaxial nonproportional cyclic stressings at elevated temperature // *J. Eng. Mater. Technol.*, 1985. vol. 107, no. 2. pp. 101–109. <https://doi.org/10.1115/1.3225781>.
 7. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage state and its experimental verification // *J. Mec. Theor. Appl.*, 1982. vol. 1, no. 5. pp. 743–761.
 8. Gorokhov V., Kazakov D., Kapustin S., Churilov Y. Simulation of fracture of heat-resistant alloys under creep and neutron irradiation conditions // *Procedia Structural Integrity*, 2020. no. 28. pp. 1416–1425. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.114>.
 9. Rabotnov Yu. N. *Creep problems in structural members*. Amsterdam, London: North-Holland Publ., 1969. xiv+822 pp.
 10. Радченко В. П., Еремин Ю. А. *Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций*. М.: Машиностроение-1, 2004. 263 с.
 11. Murakami S., Ohno N. A constitutive equation of creep based on the concept of a creep-hardening surface // *Int. J. Solids Struct.*, 1982. vol. 18, no. 7. pp. 597–609. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(82\)90042-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(82)90042-7).
 12. Igumnov L. A., Vlasov S. Y., Kazakov D. A., Zhegalov D. V., Modin I. A. Experimental studies of elastic-plastic deformation of structural materials under conditions of triaxial loading / *Multiscale Solid Mechanics / Advanced Structured Materials*, 141. Cham: Springer, 2021. pp. 203–212. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54928-2_16.
 13. А. В. Кочетков, Н. В. Леонтьев, И. А. Модин, А. О. Савихин Исследование деформационных и прочностных свойств металлических плетеных сеток // *Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех.*, 2018. №52. С. 53–62. <https://doi.org/10.17223/19988621/52/6>.
 14. Modin I. A., Kochetkov A. V., Leontiev N. V. Numerical simulation of quasistatic and dynamic compression of a granular layer // *AIP Conference Proceedings*, 2019. vol. 2116, 270003. <https://doi.org/10.1063/1.5114277>.
 15. Balandin V. V., Kochetkov A. V., Krylov S. V., Modin I. A. Numerical and experimental study of the penetration of a package of woven metal grid by a steel ball // *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019. vol. 1214, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1214/1/012004>.
 16. Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г. *Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций*. Н. Новгород: Нижегородск. гос. ун-т, 1999. 226 с.
 17. Волков И. А., Коротких Ю. Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
 18. Капустин С. А., Горохов В. А., Чурилов Ю. А. Численное моделирование процесса разрушения экспериментального образца с концентратором в условиях плоского изгиба // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2010. №6. С. 47–53.
 19. Волков И. А., Игумнов Л. А., Коротких Ю. Г., Казаков Д. А., Емельянов А. А., Тарасов И. С., Гусева М. А. Программная реализация процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при термомеханическом нагружении // *Проблемы прочности и пластичности*, 2016. Т. 78, №2. С. 188–207. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-2-188-207>.

MSC: 74-05, 74C99

Experimental studies of high-temperature creep of titanium alloy VT6 under conditions of a complex stress state under the influence of an aggressive medium

© L. A. Igumnov^{1,2}, D. A. Kazakov^{1,2}, D. N. Shishulin^{1,2},
I. A. Modin^{1,2}, D. V. Zhegalov²

¹ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation.

² Research Institute of Mechanics,
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
23, korp. 6, pr. Gagarina, Nizhny Novgorod, 603022, Russian Federation.

Abstract

The results of experimental studies of high-temperature creep and long-term strength under conditions of a uniaxial and complex stress-strain state are presented. Tests for uniaxial tension, torsion and their combined action.

The tests were carried out on laboratory tubular specimens made of VT6 material at a temperature of 600°C as delivered and under conditions of exposure to an aggressive environment. An aggressive environment was created by preliminary hydrogenation of laboratory samples with different hydrogen-ion concentration by mass C_m equal to 0.15 % and 0.3 %.

Experimental information for the construction of material parameters and scalar functions of a thermal creep model with isotropic-kinematic hardening is presented. This information is obtained from basic experiments to determine: the initial radius of the zero level creep surface; fans of creep curves at different levels of specified stresses, with obtaining the characteristics of the third section on the creep diagram, which precedes the failure of the sample at a fixed temperature at a given time interval; torsional creep curves up to the moment of loss of stability in the working part of the specimen. Based on the results of tests for uniaxial loading, two levels of stress intensity were selected, with different combinations of which experiments were carried out under conditions of complex loading.

Research Article

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this article in press as:

Igumnov L. A., Kazakov D. A., Shishulin D. N., Modin I. A., Zhegalov D. V. Experimental studies of high-temperature creep of titanium alloy VT6 under conditions of a complex stress state under the influence of an aggressive medium, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2021, vol. 25, no. 2, pp. 286–302. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1850> (In Russian).

Authors' Details:

Leonid A. Igumnov  <https://orcid.org/0000-0003-3035-0119>

Dr. Phys. & Math. Sci., Professor; Leading Researcher; Dept. of Applied Mathematics and Computer Science¹; Chief Researcher; Lab. of Simulation of Physical and Mechanical Processes²; e-mail: igumnov@mech.unn.ru

Dmitriy A. Kazakov  <https://orcid.org/0000-0002-9316-4105>

Cand. Techn. Sci.; Researcher; Dept. of Applied Mathematics and Computer Science¹; Researcher; Lab. of Physical and Mechanical Testing of Materials²; e-mail: kazakov@mech.unn.ru

The results of experimental studies of high-temperature creep and long-term strength under several different programs of isothermal loading under conditions of a complex stress-strain state are presented. Investigations are carried out for specimens made of VT6 alloy at delivery condition, under conditions of exposure to an aggressive environment. The obtained experimental information makes it possible to determine the necessary material parameters and to verify the used mathematical model of thermal creep.

Keywords: hydrogen saturation, unsteady creep, long-term strength, damage, resource, basic experiment, material parameters, complex loading.

Received: 10th March, 2021 / Revised: 21st April, 2021 /

Accepted: 11th May, 2021 / First online: 28th June, 2021

Competing interests. We declare that we have no conflicts of interest in the authorship and publication of this article.

Authors' contributions and responsibilities. L.A. Igumnov: Visualization and verification of results; Writing — original draft and review & editing. D.A. Kazakov: Idea of study; Formulation of research goals and aims; Visualization and verification of results; Writing — original draft and review & editing. D.N. Shishulin: Determination of the chemical composition of the alloy; Visualization and verification of results; Writing — original draft and review & editing. I.A. Modin: Experimental research; Visualization and verification of results; Writing — original draft and review & editing. D.V. Zhegalov: Experimental research; Processing and analysis of results; Writing — original draft and review & editing. The authors are absolutely responsible for submitting the final manuscript in print. Each author has approved the final version of manuscript.

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (RSF 19–19–00062, Samara State Technical University).

References

1. Volkov I. A., Igumnov L. A., Kazakov D. A., Shishulin D. N., Tarasov I. S. State equations of unsteady creep under complex loading, *J. Appl. Mech. Techn. Phys.*, 2018, vol. 59, no. 3, pp. 551–560. <https://doi.org/10.1134/S0021894418030203>.
2. Volkov I. A., Igumnov L. A., Tarasov I. S., Shishulin D. N., Smetanin I. V. Evaluating long-term strength of structural elements subjected to thermal-mechanical loading, *Problems of Strength and Plasticity*, 2018, vol. 80, no. 4, pp. 495–512 (In Russian). <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-4-494-512>.
3. Lokoshchenko A. M. *Creep and long-term strength of metals*. Boca, Raton, CRC Press, 2018, xviii+545 pp. <https://doi.org/10.1201/b22242>.

Denis N. Shishulin  <https://orcid.org/0000-0002-6527-557X>

Cand. Techn. Sci.; Researcher; Dept. of Applied Mathematics and Computer Science¹; Researcher; Lab. of Physical and Mechanical Testing of Materials²; e-mail: shishulindn@gmail.com

Ivan A. Modin  <https://orcid.org/0000-0002-3561-4606>

Cand. Techn. Sci.; Researcher; Dept. of Applied Mathematics and Computer Science¹; Researcher; Lab. of Simulation of Physical and Mechanical Processes²; e-mail: mianet@mail.ru

Dmitriy V. Zhegalov  <https://orcid.org/0000-0002-7282-598X>

Cand. Techn. Sci.; Senior Researcher; Lab. of Problems of Strength, Dynamics and Resource²; e-mail: zhegalov@mech.unn.ru

4. Volkov I. A., Igumnov L. A., Kazakov D. A., Mironov A. A., Tarasov I. S., Shishulin D. N., Smetanin I. V. damaged medium model for describing the process of long-term strength of structural materials (metals and their alloys), *Problems of Strength and Plasticity*, 2017, vol. 79, no. 3, pp. 285–300 (In Russian). <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-3-285-300>.
5. Bondar V. S., Abashev D. R., Petrov V. K. Comparative analysis of variants of plasticity theories under cyclic loading, *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 2, pp. 23–44 (In Russian). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.2.02>.
6. Ohashi Y., Kawai M., Kaito T. Inelastic behavior of type 316 stainless steel under multiaxial nonproportional cyclic stressings at elevated temperature, *J. Eng. Mater. Technol.*, 1985, vol. 107, no. 2, pp. 101–109. <https://doi.org/10.1115/1.3225781>.
7. Murakami S., Imaizumi T. Mechanical description of creep damage state and its experimental verification, *J. Mec. Theor. Appl.*, 1982, vol. 1, no. 5, pp. 743–761.
8. Gorokhov V., Kazakov D., Kapustin S., Churilov Y. Simulation of fracture of heat-resistant alloys under creep and neutron irradiation conditions, *Procedia Structural Integrity*, 2020, no. 28, pp. 1416–1425. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.114>.
9. Rabotnov Yu. N. *Creep problems in structural members*. Amsterdam, London, North-Holland Publ., 1969, xiv+822 pp.
10. Radchenko V. P., Eremin Yu. A. *Reologicheskoe deformirovanie i razrushenie materialov i elementov konstruktzii* [Rheological Deformation and Destruction of Materials and Structural Elements]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2004, 263 pp. (In Russian)
11. Murakami S., Ohno N. A constitutive equation of creep based on the concept of a creep-hardening surface, *Int. J. Solids Struct.*, 1982, vol. 18, no. 7, pp. 597–609. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(82\)90042-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(82)90042-7).
12. Igumnov L. A., Vlasov S. Y., Kazakov D. A., Zhegalov D. V., Modin I. A. Experimental studies of elastic-plastic deformation of structural materials under conditions of triaxial loading, In: *Multiscale Solid Mechanics*, Advanced Structured Materials, 141. Cham, Springer, 2021, pp. 203–212. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54928-2_16.
13. Kochetkov A. V., Leont'ev N. V., Modin I. A., Savikhin A. O. Study of the stress-strain and strength properties of the metal woven grids, *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Mat. Mekh.* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics], 2018, no. 52, pp. 53–62 (In Russian). <https://doi.org/10.17223/19988621/52/6>.
14. Modin I. A., Kochetkov A. V., Leontiev N. V. Numerical simulation of quasistatic and dynamic compression of a granular layer, *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2116, 270003. <https://doi.org/10.1063/1.5114277>.
15. Balandin V. V., Kochetkov A. V., Krylov S. V., Modin I. A. Numerical and experimental study of the penetration of a package of woven metal grid by a steel ball, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1214, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1214/1/012004>.
16. Kazakov D. A., Kapustin S. A., Korotkikh Yu. G. *Modelirovanie protsessov deformirovaniia i razrusheniia materialov i konstruktzii* [Modeling of the Processes of Deformation and Fracture of Materials and Structures]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Univ., 1999, 226 pp. (In Russian)
17. Volkov I. A., Korotkikh Yu. G. *Uravneniia sostoiianiia viazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniiami* [Equations of State of Viscoelastic Plastic Media with Damage]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 424 pp. (In Russian)
18. Kapustin S. A., Gorokhov V. A., Churilov Y. A. Numerical simulation of the failure process for an experimental sample with a concentrator under plane bending conditions, *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2010, vol. 39, no. 6, pp. 549–553. <https://doi.org/10.3103/S1052618810060063>.
19. Volkov I. A., Igumnov L. A., Korotkikh Yu. G., Kazakov D. A., Emelyanov A. A., Tarasov I. S., Guseva M. A. Software implementation of viscoplastic deformation and damage accumulation processes in structural alloys under thermal-mechanical loading, *Problems of Strength and Plasticity*, 2016, vol. 78, no. 2, pp. 188–207 (In Russian). <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-2-188-207>.