Модель упруговязкопластичности полилактида для анализа деформирования костных решетчатых скаффолдов на разных структурных уровнях / И.Э. Келлер, Н.В. Еленская, А.А. Адамов, И.В. Виндокуров, М.А. Ташкинов. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.08 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 4. – С. 98–112.

Perm Polytech Style: Keller I.E., Elenskaya N.V., Adamov A.A., Vindokurov I.V., Tashkinov M.A. Viscoelastic-plastic model of polylactide for analyzing deformation of bone lattice scaffolds at different structural levels. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 4, pp. 98-112. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.08

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.08
УДК 539.374

МОДЕЛЬ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ ПОЛИЛАКТИДА ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОСТНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ СКАФФОЛДОВ НА РАЗНЫХ СТРУКТУРНЫХ УРОВНЯХ

И.Э. Келлер[1], Н.В. Еленская[1], А.А. Адамов[2], И.В. Виндокуров[1], М.А. Ташкинов[1]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация
[2]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 августа 2025 г.
Одобрена: 15 октября 2025 г.
Принята к публикации: 20 октября 2025 г.

Ключевые слова:

полилактид, костные скаффолды, FDM-печать, модель упруговязкопластичности, рэтчетинг. зависимость от скорости деформаций, закон упрочнения Джонсона – Кука, численный расчет, эксперимент, микромеханика.

АННОТАЦИЯ

Решетчатые структуры из биоразлагаемых полимеров (скаффолды) используются в биомедицинских приложениях для замещения поврежденной костной ткани. Для понимания связанных деформационных и биологических процессов, происходящих в микронеоднородном материале, необходимо использование адекватной модели упруговязкопластичности материала. С этой целью предпринято экспериментальное исследование полилактида, включающего следующие программы нагружения: (а) несколько циклов одноосного стесненного сжатия с различными скоростями деформирования, (б) одноосное свободное сжатие с различными скоростями деформирования, (в) одноосное свободное сжатие по программе нагружения с циклами нагружения и разгрузки с выдержками со ступенчатыми повышением максимального напряжения, а также (г) одноосное свободное сжатие по треугольным отнулевым циклам нагружения при различных значениях максимального напряжения. Для численного исследования особенностей неоднородного распределения деформаций и напряжений при деформировании решетчатого скаффолда из полилактида сжатием в зависимости от скорости деформирования использована модель упругопластичности с законом упрочнения Джонсона – Кука, константы которой были определены экспериментально по данным испытаний (*а*)–(*б*). Обнаружено, что с увеличением деформаций сжатия образца скаффолда от 2,7 до 10,7 % начинает заметно проявляться зависимость пространственного распределения эквивалентных напряжений и скоростей деформаций от скорости деформации сжатия, приложенной к образцу, в диапазоне изменения от $1{,}11 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}11 \cdot 10^{-1}$ $с^{-1}$. Это показывает важность учета зависимости упруговязкопластических свойств полилактида от скорости деформации для корректного описания локализации пластической деформации и концентрации напряжений, влияющих на микромеханику различных физико-химических и механических процессов в скаффолдах в условиях эксплуатации. Также установлено, что использованная для описания одноосного нагружения модель упругопластичности качественно описывает поведение сплошных образцов полилактида при их нагружении: релаксацию напряжений на этапах выдержки при превышении напряжения текучести, а также накопление вязкопластических деформаций в циклах (рэтчетинг). Данные эффекты представляются важными для описания деформирования скаффолдов из полилактида в процессах отнулевого циклического нагружения с выдержками при максимальных значениях, повторяющих ходьбу человека.

© **Келлер Илья Эрнстович** – д. ф.-м. н., доцент, профессор кафедры «Динамика и прочность машин», e-mail: kie@icmm.ru
Еленская Наталия Витальевна – к. ф.-м. н., доцент кафедры динамики и прочности машин, с. н. с., e-mail: n.elenskaya@pstu.ru
Адамов Анатолий Арсангалеевич – д. ф.-м. н., в. н. с., e-mail: adamov@icmm.ru
Виндокуров Илья Владимирович – инженер кафедры динамики и прочности машин, м. н. с., e-mail: ivv@pstu.ru
Ташкинов Михаил Анатольевич – к. ф.-м. н., доцент кафедры динамики и прочности машин, заведующий, e-mail: m.tashkinov@pstu.ru

Ilya E. Keller – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines, e-mail: kie@icmm.ru
Nataliya V. Elenskaya – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines, Senior Researcher at the Research Laboratory of Mechanics of Biocompatible Materials and Devices, e-mail: n.elenskaya@pstu.ru
Anatoliy A. Adamov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Institute of Continuous Media Mechanics, e-mail: adamov@icmm.ru
Ilya V. Vindokurov – Engineer, Department of Dynamics and Strength of Machines, Junior Researcher at the Research Laboratory of Mechanics of Biocompatible Materials and Devices, e-mail: ivv@pstu.ru
Mikhail A. Tashkinov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines, Head of the Research Laboratory of Mechanics of Biocompatible Materials and Devices, e-mail: m.tashkinov@pstu.ru

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

VISCOELASTIC-PLASTIC MODEL OF POLYLACTIDE FOR ANALYZING DEFORMATION OF BONE LATTICE SCAFFOLDS AT DIFFERENT STRUCTURAL LEVELS

I.E. Keller[1], N.V. Elenskaya[1], A.A. Adamov[2], I.V. Vindokurov[1], M.A. Tashkinov[1]

[1]Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2]Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 August 2025
Approved: 15 October 2025
Accepted for publication: 20 October 2025

Keywords:

Polylactide, bone scaffolds, FDM printing, viscoelastic-plasticity model, ratcheting, strain rate dependence, Johnson–Cook hardening law, numerical simulation, experiment, micromechanics.

ABSTRACT

Lattice structures made from biodegradable polymers are widely used in biomedical applications to replace damaged bone tissue. To accurately capture the associated deformation and biological processes in such micro-heterogeneous materials, it is essential to employ an appropriate viscoelastic-plastic material model. To this end, an experimental investigation of polylactide was conducted, encompassing the following loading protocols: (a) multiple cycles of uniaxial confined compression at various strain rates; (b) uniaxial free compression at different strain rates; (c) uniaxial free compression with cyclic loading-unloading sequences including holds and stepwise increases in stress amplitude; and (d) uniaxial free compression under triangular zero-based cyclic loading at varying stress amplitudes. For the numerical study of spatial heterogeneity in strain and stress distributions during compression of the polylactide scaffold, dependent on strain rate, a viscoplasticity model incorporating the Johnson-Cook hardening law was employed, with model constants derived experimentally from tests (a) and (b). Results showed that as compressive strain increased from 2.7 % to 10.7 %, the spatial distribution of equivalent stresses and strain rates exhibited a clear dependence on the applied compression strain rate within the range of $1.11 \cdot 10^{-4}$ to $1.11 \cdot 10^{-1}$ s^{-1}. This underscores the critical importance of accounting for strain-rate sensitivity in polylactide's viscoelastic-plastic behavior to accurately describe the localization of plastic deformation and stress concentrations, which govern the micromechanics of various physico-chemical and mechanical processes in scaffolds during use. Furthermore, the employed viscoplasticity model qualitatively captured the key features of bulk polylactide behavior under uniaxial loading, including stress relaxation during hold phases when stress exceeds the yield limit, as well as the accumulation of viscoplastic strains in cyclic loading (ratcheting). These phenomena are especially relevant for modeling the deformation of polylactide scaffolds subjected to zero-based cyclic loading with holds at amplitude levels representative of human gait.

Введение

Скаффолды (решетчатые структуры) из биоразлагаемых полимеров используются в биомедицинских приложениях для замещения поврежденной костной ткани [1; 2]. При проектировании персонифицированных изделий необходимо понимать связанные деформационные и биологические процессы, происходящие в материале на уровне его заданных структурных неоднородностей [3; 4]. Напряжения играют существенную роль в процессах переноса компонент биологических жидкостей, пронизывающих скаффолд, и их реакции с его материалом; биодеградация ведет изменению напряженно-деформированного состояния в скаффолде и накоплению повреждений, способному привести к разрушению [5; 6]. В структурах с неоднородной морфологией, приближающей микроструктуру костной ткани, концентрация напряжений и локализация пластических деформаций только усугубляет происходящие связанные механико-биологические микропроцессы. Полимерные материалы, используемые при изготовления костных скаффолдов, при температуре тела человека проявляют сложно связанные нелинейные вязкопластические и вязкоупругие свойства. Реономность деформационных свойств таких материалов влияет на напряженно-деформированное состояние скаффолда при его нагружении в условиях его эксплуатации.

Скаффолды из биоразлагаемых полимеров в биомедицинских приложениях испытывают циклические нагрузки в процессе эксплуатации. Если, как в элементах опорно-двигательного аппарата, такое циклическое нагружение несимметрично, в материале имплантата будет происходить накопление неупругих деформаций (ratchetting), приводя к повреждаемости материала и, возможно, к усталостному разрушению.

Деформации рэтчетинга в полимерных материалах при температуре тела человека состоят из пластической и вязкой компонент (за счет циклической ползучести). Деформации рэтчетинга и усталостная долговечность полимеров зависят от скорости циклического нагружения или величины выдержки при максимальном значении напряжения в цикле. Это свойство демонстрирует проявление вязкоупругих свойств материала. Для расчетов на прочность полимерных имплантатов необходима подходящая модель упруговязкопластичности, которая способна адекватно описывать эффекты при циклическом нагружении, и процедура ее калибровки по результатам базовых испытаний, выбор программы которых также является предметом отдельного исследования.

Методики исследования рэтчетинга при одноосном и многоосном циклическом нагружении с различной асимметрией и выдержкой в цикле, а также модели упруговязкопластичности для описания такого поведения интенсивно развивались для высокотемпературного термомеханического нагружения металлических сплавов [7–10]. Однако до сих пор эти наработки толком не использовались применительно к полимерам при комнатной или немного повышенной температурах, проявляющим родственное поведение. Можно указать стоящие особняком модели упруговязкопластичности [11–20], описывающие поведение полимеров при сложных историях нагружения. Известны систематические экспериментальные исследования рэтчетинга политетрафторэтилена [21–24], медицинского полиэтилена со сверхвысокой молекулярной массой [25], полиацеталя [26], поликапролактона, насыщенного гелем на основе поливинилового спирта [27], интересного как биоразлагаемый материал для инженерии хрящевой ткани, поликарбоната [28], термопластичного полиуретана, наполненного 30–40 вес.% микрокапсулами парафина [29], нейлона [30], полиэфирэфиркетона [31] и полилактида [20; 32; 33]. Большинством авторов испытания полимеров при циклическом сжатии выполнялись по пилообразным программам на сервогидравлических машинах с контролем скорости напряжений либо на электромеханических машинах с контролем скорости перемещения траверсы между минимальным и максимальным значениями напряжений в цикле при комнатной температуре. При этом скорости напряжений либо перемещения траверсы варьировались в диапазоне 1–5-го порядков и амплитудные (максимальные по модулю) значения напряжений – вплоть до значений, при которых наблюдается текучесть материала, не приводящая к локализации неупругой деформации образца. В качестве образцов, как правило, использовались цилиндры, произведенные по аддитивной технологии. В целом можно отметить общие тенденции нелинейного роста деформаций рэтчетинга с увеличением амплитуды напряжений и с понижением скорости нагружения. Также отмечается, что деформации рэтчетинга затухают, но не прекращаются с увеличением числа циклов вплоть до конца программы испытания (от нескольких сотен до нескольких тысяч циклов в зависимости от амплитуды напряжения). Не выявлена зависимость мгновенного модуля упругости от скорости деформации в указанном выше диапазоне, при этом выявлена существенная зависимость от нее деформационной кривой за пределом упругости. Укажем два исследования влияния выдержек при максимальном напряжении в цикле, одно из которых [28] выявило зависимость, а другое [33] – нет.

Настоящая работа имеет целью экспериментальное исследование проявления реономных свойств полилактида в оригинальных программах нагружения на одноосное сжатие в диапазоне трех порядков изменения скоростей деформаций, предложенных авторами. Выбор базовых программ нагружения ранее обсуждался в работах [10; 14; 15]. Для описания экспериментальных данных использована популярная в пакетах прикладных программ простейшая модель упруговязкопластичности с законом пластического течения, ассоциированным с функцией текучести Мизеса, и законом упрочнения Джонсона – Кука, константы которой были определены по стабильному (возрастающему) участку деформационных кривых из данных испытаний. Исследована возможность описания моделью концентрации напряжений и локализации неупругих деформаций при деформировании образца скаффолда в широком диапазоне скоростей и амплитуд деформаций, а также описание релаксации напряжений при ступенчатой программе изменения напряжения с выдержками и накопления неупругих деформаций при циклических изменениях напряжений.

1. Материалы и методы

1.1. Изготовление образцов

Сплошные цилиндрические образцы PLA диаметром 20,06 мм и высотой 19,5 ± 0,2 мм (рис. 1, *а*) были напечатаны на принтере Raise3D Pro3 (США) по технологии послойного наплавления филамента. Использовался белый филамент REC PLA (Россия) и красный Raise3D Premium PLA (Китай) диаметром 1,75 мм, который экструдировался через сопло диаметром 0,4 мм. Параметры печати приведены в табл. 1. Паспортные физико-механические характеристики филамента и напечатанных из него образцов имели близкие значения, кроме значений модуля упругости напечатанных образцов на растяжение. Плоскопараллельность торцов цилиндрических образцов обеспечивалось токарной обработкой и шлифовкой на притирочной плите.

Таблица 1

Параметры печати образцов PLA

Table 1

PLA sample printing parameters

Параметр процесса	Значение
Скорость перемещения сопла (мм/мин)	3600
Температура сопла (°C)	225
Температура стола (°C)	65
Высота слоя (мм)	0,1
Ширина экструзии (мм)	0,4
Заполнение	Концентрическое от центра к краю
Плотность заполнения (%)	100
Охлаждение (%)	100

1.2. Программы испытаний на сжатие

Испытания на стесненное сжатие. Испытания на стесненное сжатие выполнялись на универсальной электромеханической испытательной машине Zwick Z100 при температуре +23 °C.



a *b*

Рис. 1. Образцы (*a*) и приспособление для испытания на одноосное стесненное сжатие (*b*)

Fig. 1. Specimens (*a*) and apparatus for the uniaxial confined compression test (*b*)

Для этого использован толстостенный полый стальной цилиндр с плотно пригнанным входящим в него стальным штоком, установленный на сферический центрирующий шарнир (рис. 1, *b*). На поверхности контакта образца с полированными поверхностями оснастки была нанесена смазка «ЦИАТИМ-201Ф». Данное приспособление позволяет получать надежные данные до величин осевых сжимающих напряжений 150 МПа.

Программа состояла из трех блоков, каждый из которых содержал три повторяющихся цикла нагружения до 60 МПа и полной разгрузки с постоянной скоростью перемещения траверсы (± 3, $\pm 0{,}5$ и $\pm 0{,}1$ мм/мин, что соответствует скоростям деформации $\pm 2{,}5\cdot10^{-3}$, $\pm 4{,}16\cdot10^{-4}$ и $\pm 8{,}33\cdot10^{-5}$ с$^{-1}$ последовательно в соответствующем блоке.

Испытания на свободное сжатие. Испытания на свободное сжатие выполнялись на универсальной электромеханической испытательной машине СМАРТЕСТ STU 510 (Россия, Китай) при температуре +23 °C (рис. 2). Использовался высокоточный независимый датчик нагрузки до 50 кН и штатный длинноходовый экстензометр. Использовалось плиты диаметром 50 мм с центрирующими канавками и шаровым шарниром для самоустановления плотного контакта с торцами образцов. Для устранения трения по торцам образцов использовались 2 слоя пленки ПТФЭ 50 мкм со смазкой «ЦИАТИМ-221Ф».

Осуществлялись следующие программы нагружения. Первая из них предусматривала нагружение с постоянной скоростью перемещения траверсы (0,1, 3 или 100 мм/мин, что соответствует скоростям деформации $8.33\cdot10^{-5}$, $2.5\cdot10^{-3}$ и $8.33\cdot10^{-2}$ с$^{-1}$) до напряжения 60 МПа либо до начала разупрочнения, т.е. в пределах стабильного (возрастающего) участка деформационной кривой, а также разгрузку. Полные деформационные кривые, содержащие нестабильные участки, были определены ранее [34], но в рамках настоящей работы они не рассматриваются. Вторая программа содержала последовательно выполняемые блоки, содержащие этапы нагрузки со скоростью перемещения траверсы 3 мм/мин до максимального значения напряжения блока 10, 20, 30, 40, 50 и 60 МПа, выдержки при фиксированной деформации в течение 300 с, полной разгрузки и выдержки при фиксированной деформации в течение 300 с. Третья программа содержала 100 отнулевых треугольных циклов деформации со скоростью перемещения траверсы 1 мм/мин ($8.33\cdot10^{-4}$ с$^{-1}$) до максимального значения напряжения 60, 65 и 70 МПа.

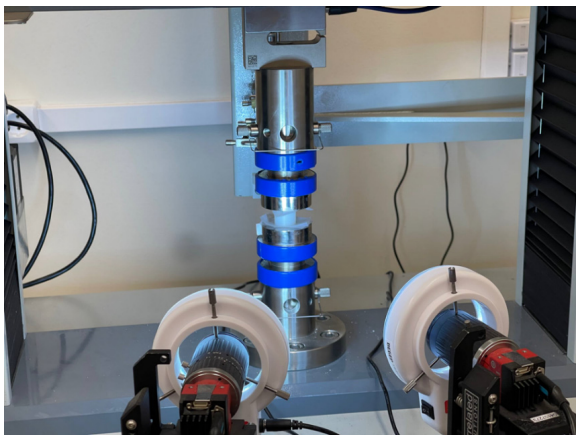


Рис. 2. Испытание на одноосное свободное сжатие цилиндрического образца

Fig. 2. Uniaxial free compression test of a cylindrical specimen

1.3. Модель упруговязкопластичности полилактида

Полагается, что среднее напряжение $\Sigma = \frac{1}{3}\mathrm{tr}\boldsymbol{\sigma}$ связывается с объемной деформацией $\Theta = \mathrm{tr}\,\boldsymbol{\varepsilon}$ упругим законом

$$\Sigma = K_1\Theta + K_2\Theta^2 . \qquad (1)$$

Сдвиговые упруговязкопластические свойства описываются соотношениями между девиаторами напряжений $\mathbf{s}=\boldsymbol{\sigma}-\Sigma\mathbf{I}$ и деформаций $\mathbf{e}=\boldsymbol{\varepsilon}-\frac{1}{3}\Theta\mathbf{I}$, отвечающими структурной схеме, приведенной на рис. 3. Полная деформация $\mathbf{e}$ складывается из упругой $\mathbf{e}^e$ и вязкопластической $\mathbf{e}^{vp}$ компонент

$$\mathbf{e}=\mathbf{e}^e+\mathbf{e}^{vp}. \tag{2}$$

Упругая компонента связывается с девиатором напряжений линейным законом

$$\mathbf{s}=2G\mathbf{e}^e. \tag{3}$$

Вязкопластическая компонента удовлетворяет закону пластического течения

$$\dot{\mathbf{e}}^{vp}=\begin{cases}\dot{p}\mathbf{N}, \text{ если } s=\sigma_y(p) \text{ и } \dot{\mathbf{s}}:\mathbf{N}>0,\\ 0, \text{ в противном случае}\end{cases} \quad \mathbf{N}=\sqrt{\tfrac{3}{2}}\frac{\mathbf{s}}{s},\ s=\sqrt{\tfrac{3}{2}\mathbf{s}:\mathbf{s}}, \tag{4}$$

где $s(\mathbf{s})=\sqrt{\frac{3}{2}\mathbf{s}:\mathbf{s}}$ – функция текучести Мизеса (интенсивность напряжений), $\mathbf{s}=\boldsymbol{\sigma}-\sigma\mathbf{I}$ – девиатор тензора напряжений, $\mathbf{N}=\frac{\partial s(\mathbf{s})}{\partial\mathbf{s}}\Big/\left|\frac{\partial s(\mathbf{s})}{\partial\mathbf{s}}\right|$ – тензор, направление которого совпадает с направлением внешней нормали к поверхности текучести,

$$\dot{p}=\dot{p}_0\exp\left(\frac{s-\sigma_y(p)}{C\sigma_y(p)}\right), \tag{5}$$

$$\sigma_y(p)=A+Bp^n, \tag{6}$$

где

$$p=\int_0^t\dot{p}dt, \quad \dot{p}=\sqrt{\tfrac{2}{3}\dot{\mathbf{e}}^{vp}:\dot{\mathbf{e}}^{vp}} \tag{7}$$

– накопленная вязкопластическая деформация и ее скорость.

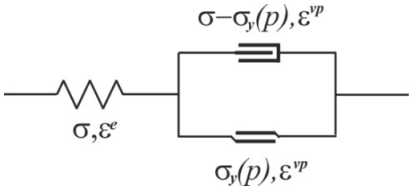


Рис. 3. Структурная схема модели упруговязкопластичности (2)–(7)

Fig. 3. Structural scheme of the viscoelastic-plasticity model (2)–(7)

Соотношение (6) описывает деформационное упрочнение в пластическом элементе, а (5), (6) совместно соответствуют закону упрочнения Джонсона – Кука [35]:

$$s=\left(A+Bp^n\right)\left(1+C\ln\frac{\dot{p}}{\dot{p}_0}\right), \tag{8}$$

где A – предел текучести материала при испытаниях для опорной скорости $\dot{p}_0$, B – константа деформационного упрочнения, n – коэффициент деформационного упрочнения, C – коэффициент упрочнения в зависимости от скорости деформации, $\dot{p}_0$ – опорная скорость деформации.

При этом кривая нагружения аппроксимируется соотношением

$$\varepsilon=\frac{\sigma}{E}+\left(\frac{\sigma-A\left(1+C\ln\left(\dot{p}/\dot{p}_0\right)\right)}{B\left(1+C\ln\left(\dot{p}/\dot{p}_0\right)\right)}\right)^{1/n}, \tag{9}$$

где ε – полные деформации, а σ – напряжения при одноосном сжатии (знак обеих переменных инвертирован для удобства).

Напряжение $\mathbf{s}$ имеет место в упругом элементе (см. рис. 3), напряжение $\sigma_y(p)\mathbf{N}$ – в пластическом, и напряжение $\mathbf{s}-\sigma_y(p)\mathbf{N}$ (overstress) – в нелинейно-вязком. Необходимо заметить, что в момент прекращения деформаций пластический элемент не может зафиксировать деформации в параллельно соединенных неупругих элементах, поскольку в реологической модели существует мгновенная вязкоупругая составляющая напряжения, поэтому вязкопластическая деформация будет расти во время релаксации напряжения до равновесного значения.

1.4. Постановка задачи о сжатии скаффолда

Для исследования влияния неупругих свойств полилактида на механический отклик решетчатых структур скаффолдов в качестве элементарной ячейки была выбрана ячейка на основе поверхности гироида [36]:

$$\begin{aligned}\phi(x,y,z)=&\cos(\alpha x)\sin(\beta z)+\cos(\beta z)\sin(\gamma y)+\\&+\cos(\gamma y)\sin(\alpha x)+C=0.\end{aligned} \tag{10}$$

На ее основе была создана пластинчатая функционально-градиентная структура (рис. 4)

$$\left(\phi_G\left(x,y,z,\alpha(y),\beta(y),\gamma(y)\right)\right)^2-0{,}385\le 0, \tag{11}$$

где $\alpha(y)=\beta(y)=\gamma(y)=\pi y/\left(y_{\max}-y_{\min}\right)+1$,

При постановке задачи были сделаны следующие допущения: материал считается изотропным, а структура скаффолда – сплошной, без прямого моделирования слоев и дефектов 3D-печати. На механический отклик полимерных материалов в значительной степени влияет скорость деформации [37–39], что обусловливается вязкоупругими либо вязкопластическими свойствами. Исходя из этого, задача деформационного поведения структур со сложной ТПМП-морфологией для замещения поврежденной костной ткани была поставлена в следующей формулировке:

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}=\mathbf{0},$$
$$\boldsymbol{\varepsilon}=\frac{1}{2}\left(\nabla\mathbf{u}+\mathbf{u}\nabla\right),$$
$$\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{\varepsilon}^{e}+\boldsymbol{\varepsilon}^{vp},\qquad(12)$$
$$\boldsymbol{\varepsilon}^{e}=\mathbf{S}^{e}:\boldsymbol{\sigma}=\frac{3\nu}{E}\sigma\mathbf{I}+\frac{1+\nu}{E}\boldsymbol{\sigma}$$
$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}=\begin{cases}\mathbf{0}, & \text{при } s\left(\mathbf{s}\right)<\sigma_{y}\left(p\right) \text{ или } \dot{\mathbf{s}}:\mathbf{N}\le 0,\\ \dfrac{1}{h}\mathbf{N}\mathbf{N}:\dot{\mathbf{s}}, & \text{при } s\left(\mathbf{s}\right)=\sigma_{y}\left(p\right) \text{ и } \dot{\mathbf{s}}:\mathbf{N}>0,\end{cases}$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор деформаций, $\boldsymbol{\varepsilon}^{e}$ – тензор упругих деформаций, $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$ – тензор вязкопластических деформаций, S^{e} – матрица податливости изотропного материала, зависящая от двух упругих констант: модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν, $\sigma=\frac{1}{3}tr\left(\boldsymbol{\sigma}\right)$ – среднее нормальное напряжение тензора $\boldsymbol{\sigma}$, $\mathbf{I}$ – единичный тензор второго ранга, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}$ – тензор скорости пластических деформаций, $\sigma_{y}=\left(A+Bp^{n}\right)\left(1+C\ln\frac{\dot{p}}{\dot{p}_{0}}\right)$ – предел текучести по закону Джонсона – Кука, $h=\frac{\partial\sigma_{y}\left(p\right)}{\partial p}$ – модуль деформационного упрочнения.

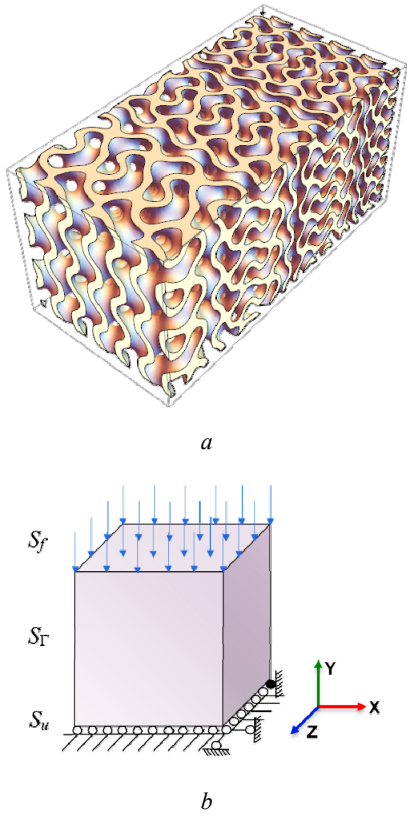


Рис. 4. Геометрическая модель скаффолда (*a*) и схема граничных условий и нагружения (*b*)

Fig. 4. Scaffold's structure (*a*) and scheme of boundary conditions and loading (*b*)

Граничные условия и параметры нагружения заданы следующим образом: верхняя грань $S_f=\left\{\left(x,y,z\right):y=y_{\max}\right\}$ равномерно нагружается $\mathbf{u}=\mathbf{U}_1\big|_{S_f}$, $\mathbf{U}_1=\left\{0,v_0t,0\right\}$ со скоростью v_0 (см. рис. 4); перемещения опорной (нижней) грани $S_{\mathbf{u}}=\left\{\left(x,y,z\right):y=y_{\min}\right\}$ ограничены по оси действия нагрузки *Y*: $\mathbf{u}\big|_{S_u}:U_y=0$, $\mathbf{u}\big|_{(x_{\max},y_{\min},z_{\min})}:U_x=0$, $\mathbf{u}\big|_{(x_{\max},y_{\min},z_{\max})}:U_x=U_z=0$; во всех узлах верхней и нижней грани запрещен поворот $\mathbf{r}\big|_{S_f}:R_x=R_y=R_z=0$, $\mathbf{r}\big|_{S_u}:R_x=R_y=R_z=0$; боковые поверхности $S_\Gamma=\left\{\left(x,y,z\right):\left\{x=x_{\min}\right\},\left\{x=x_{\max}\right\},\left\{z=z_{\min}\right\},\left\{z=z_{\max}\right\}\right\}$ свободны от нагрузки: $\boldsymbol{\sigma}\cdot\mathbf{n}\big|_{S_\Gamma}=\mathbf{0}$, где $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль к боковой поверхности S_Γ.

2. Результаты

2.1 Результаты испытаний

Стесненное сжатие. Результаты испытания образцов Raise3D Premium PLA приведены на рис. 5, *a*, в координатах напряжения и линейной деформации, причем обе переменные приняты с противоположным знаком. Диаграммы не обнаруживают статистически значимую зависимость от скорости деформации и характеризуются весьма узкими петлями гистерезиса, позволяющими считать объемное изменение упругим. Диаграммы обнаруживают нелинейность, по-видимому, связанную с реакцией на закрытую пористость материала, изготовленного аддитивным производством. На рис. 2 представлена аппроксимация данных квадратичным законом $\sigma=1450\varepsilon+30100\varepsilon^{2}$ МПа и отрезком секущей с модулем $M=2200$ МПа.

Свободное сжатие. Результаты испытания образцов Raise3D Premium PLA при монотонном нагружении (рис. 5, *b*) не обнаруживают зависимости мгновенного модуля упругости от скорости деформации в диапазоне трех порядков. Кривые монотонного нагружения приблизительно до 45 МПа следуют линейному закону с модулем E = 1750 МПа. При напряжениях, превышающих это значение, деформации имеют неупругую составляющую, что демонстрируют результаты испытания с разгрузками по второй программе (рис. 6, *a*). Неупругая составляющая деформации имеет вязкопластическую реологию.

По деформационным кривым нагрузки и разгрузки при испытании образцов на одноосное свободное сжатие были определены константы упруговязкопластической модели материала (8), которые сведены в табл. 2. Для этого экспериментальные данные аппроксимированы функцией (9) по методу наименьших квадратов. По упругим модулям на одноосное свободное и стесненное

сжатие, E и M, определяется коэффициент Пуассона $\nu = \left(\varphi - 1 + \sqrt{(\varphi-1)(\varphi-9)}\right)/4$, $\varphi = E/M$ [40], который оказывается равным 0,27.

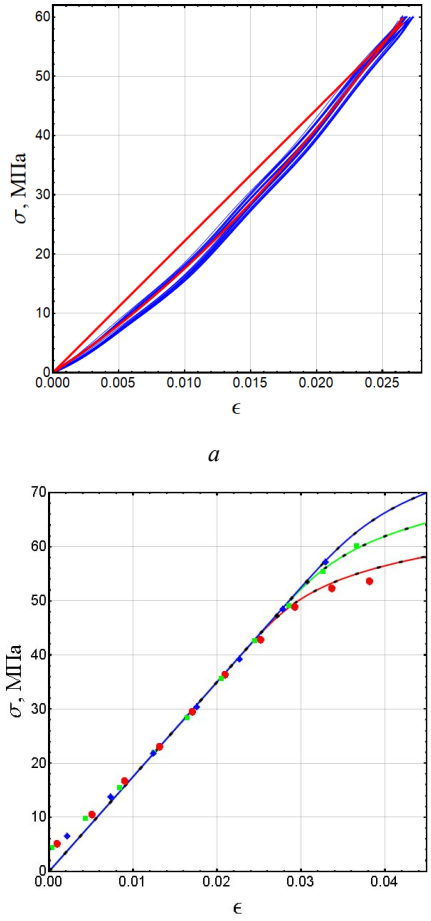


Рис. 5. Диаграммы циклического нагружения при стесненном сжатии (синие линии), ее квадратичная аппроксимация и секущая (красные линии) (*a*) и монотонного нагружения при свободном сжатии: красный – 0,1 мм/мин, зеленый – 3 мм/мин, синий – 100 мм/мин, точки – эксперимент, сплошные линии – аппроксимация законом (8), пунктирные линии – численная реализация в Abaqus (*b*)

Fig. 5. Cyclic loading diagrams under confined compression (blue lines), its quadratic approximation and secant (red lines) (*a*), and monotonic loading under unconfined compression: red – 0.1 mm/min, green – 3 mm/min, blue – 100 mm/min, points – experiment, lines – approximation by law (8) (*b*)

Таблица 2

Константы модели

Table 2

Model constants

Константа	E, МПа	A, МПа	B	n	C	$\dot{p}_0$, с$^{-1}$	ν
Значение	1750	35,60	52,65	0,19	0,04	$8{,}33\cdot10^{-5}$	0,27

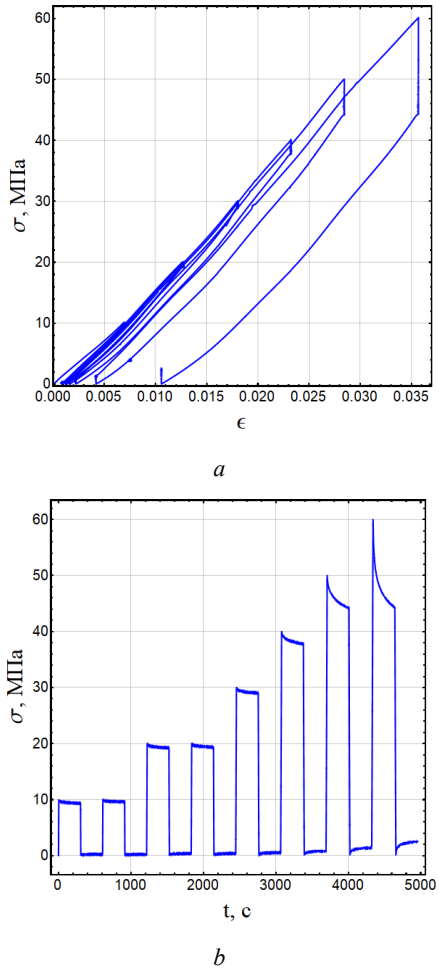


Рис. 6. Диаграмма циклического нагружения при ступенчатом нагружении с выдержками в зависимости от деформации (*a*) и от времени (*b*)

Fig. 6. Cyclic loading diagram under stepped loading with holds depending on strain (*a*) and on time (*b*)

Результаты испытания образцов Raise3D Premium PLA при циклическом деформировании со скоростью перемещения траверсы 3 мм/мин и ступенчатым ростом максимального напряжения с выдержками (рис. 6) обнаруживают вязкоупругие свойства материала, которые проявляются в виде заметной релаксации при выдержках после нагружения с максимальными напряжениями 50 и 60 МПа. Можно отметить, что после релаксации от этих двух значений напряжения практически одинаковы и составляют приблизительно 44 МПа. Можно заметить, что после нагружения до напряжений 10–40 МПа небольшая релаксация также проявляется; также можно заметить небольшую обратную релаксацию при разгрузке после нагружения до 50 и 60 МПа. В приближении линейной вязкоупругости из испытаний на релаксацию можно оценить равновесный модуль $E_\infty = \sigma_\infty / \varepsilon_a$, где σ_∞ – напряжение после релаксации при фиксированной деформации ε_a. Для максимальных напряжений от 10 до 40 МПа значение E_∞ составляет приблизительно 1600–1700 МПа, однако, начиная

с 50 МПа, равновесный модуль падает до величин порядка 1200 МПа. Это означает, что в деформации появляется пластическая (не зависящая от скорости приложения нагрузки) составляющая.

Результаты испытаний образцов REC PLA при деформировании по 100 треугольным отнулевым циклам (скорость перемещения траверсы 1 мм/мин) и постоянным максимальным напряжением приведены на рис. 7.

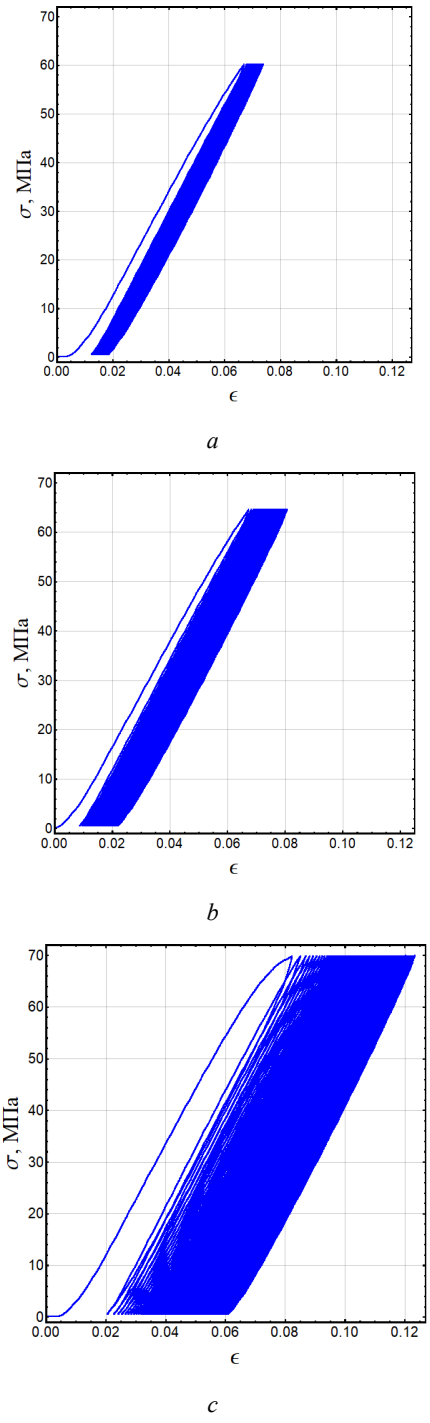


Рис. 7. Диаграммы 100 отнулевых циклов нагружения при свободном сжатии со скоростью 1 мм/мин и максимальном напряжении 60 МПа (*a*), 65МПа (*b*) и 70 МПа (*c*)

Fig. 7. Diagrams of 100 pulsating loading cycles under unconfined compression at a rate of 1 mm/min and maximum stress of 60 MPa (*a*), 65 MPa (*b*), and 70 MPa (*c*)

Испытуемый материал при асимметричном одноосном циклическом деформировании накапливает вязкопластическую сжимающую деформацию, рост которой зависит от максимального напряжения. Образцы в испытаниях сохраняли цилиндрическую форму. Величина накопленной вязкопластической деформации непропорционально растет с ростом максимального напряжения 60, 65 и 70 МПа. При этом значение накопленной вязкопластической деформации в первом цикле гораздо больше, чем во всех последующих.

2.2. Результаты численных расчетов сжатия скаффолдов

Для описания особенностей неоднородного распределения деформаций и напряжений в скаффолде в зависимости от деформации и скорости деформации численно решена задача сжатия образца. Построение геометрии модели и ее конечно-элементная дискретизация были реализованы в системе Wolfram Mathematica с последующим переносом полученной конечно-элементной модели в пакет SIMULIA Abaqus. Качество конечно-элементной модели контролировалось по результатам исследования сходимости конечно-элементной сетки, проведенных в более ранних исследованиях [41, 42]. Упругие и вязкопластические характеристики материала модели (12) были заданы в соответствии с данными, представленными в табл. 2. Предварительно была проведена валидация численной реализации используемой модели с данными константами на задаче одноосного свободного сжатия сплошного цилиндра при различных скоростях деформирования, результаты которой приведены на рис. 5, *b*. Валидация деформационного поведения скаффолдов при сжатии в упругом диапазоне была проведена ранее в исследованиях [41–43].

В численных экспериментах сопоставлялось деформационное поведение скаффолда при двух скоростях нагружения, для каждой из которых рассматривались три максимальные деформации сжатия образца (табл. 3). Следует заметить, что при заданных значениях максимальных деформаций образца локальные деформации могут превосходить деформации, за которыми материал в эксперименте проявляет нестабильность (немонотонность кривой нагружения). Поэтому можно корректно обсуждать результаты расчетов деформаций и напряжений в ограниченном диапазоне.

Для количественной оценки неоднородности распределения полей по объему скаффолда были построены сглаженные гистограммы относительной доли общего объема элементов КЭ-модели в зависимости от эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 8) и скоростей деформаций по Мизесу, нормированной на скорость деформации образца (рис. 9).

Результаты расчета демонстрируют отсутствие зависимости максимальных напряжений, приложенных к образцу, (см. колонку для деформации 2,7 %, табл. 3) и распределений полей (см. рис. 8, *a*, и рис. 9, *a*) от скоро-

сти деформации при минимальной из трех уровней деформации образца. Однако при увеличении в 2 и 4 раза максимальной деформации зависимость от скорости существенно проявляется как для максимальных напряжений, приложенных к образцу (см. колонки для деформации 5,4 и 10,8 %, табл. 3), так и для распределений полей (см. рис. 8, *b*, *c*, и рис. 9, *b*, *c*). При этом изменение характера распределений эквивалентных напряжений и нормированных скоростей деформаций свидетельствует об изменении механического поведения структуры скаффолда на микроуровне, которые необходимо исследовать отдельно. Качественное изменение развития локализации неупругих деформаций в пространстве предшествует вязкому разрушению материала.

Таблица 3

Эффективные напряжения в скаффолде в зависимости от степени деформации и скорости нагружения

Table 3

Effective stresses in the scaffold depending on the degree of deformation and loading rate

Скорость деформаций, $с^{-1}$	Деформация образца, %		
	2,7	5,4	10,8
	Эффективные напряжения, МПа		
$1{,}11 \cdot 10^{-4}$	5,63	10,20	13,93
$1{,}11 \cdot 10^{-1}$	5,63	10,88	16,37

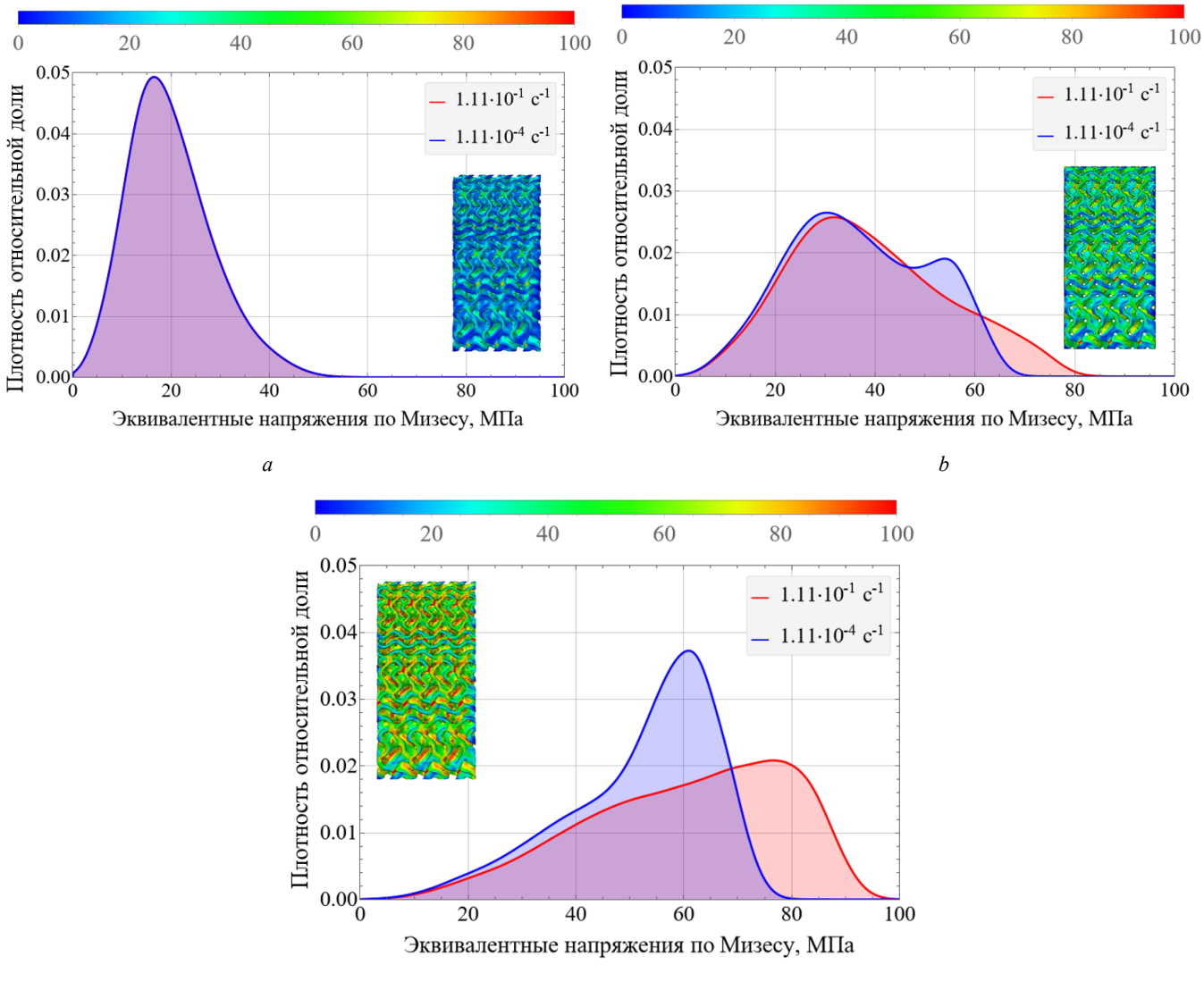


Рис. 8 Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу при сжатии на 2,7 % (*a*), 5,4 % (*b*) и 10,8 % (*c*)

Fig. 8. Distribution of von Mises equivalent stresses at compressions of 2.7 % (*a*), 5.4 % (*b*), and 10.8 % (*c*)

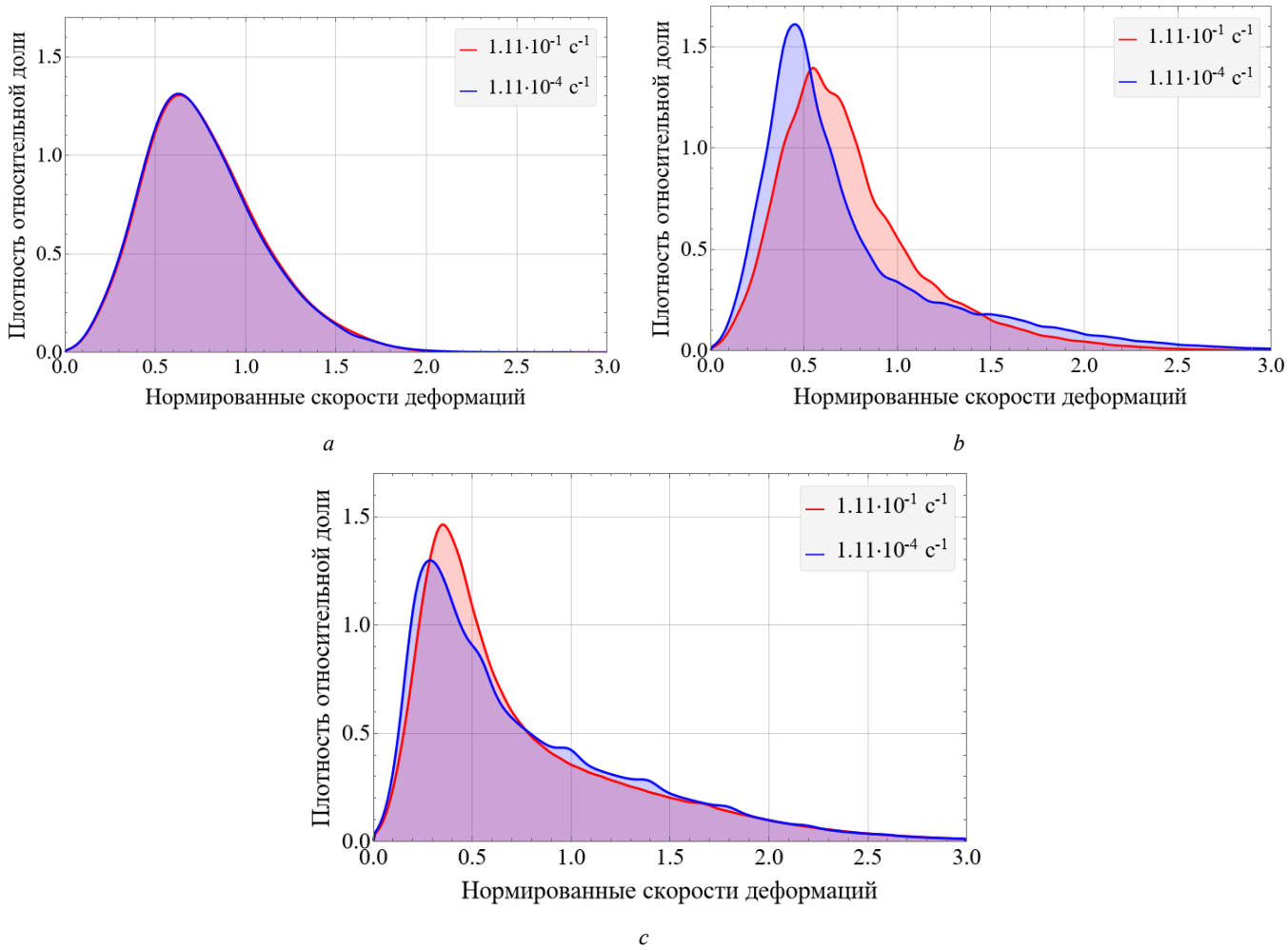


Рис. 9. Распределения нормированных эквивалентных скоростей деформаций по Мизесу при сжатии на 2,7 % (*a*), 5,4 % (*b*) и 10,8 % (*c*)

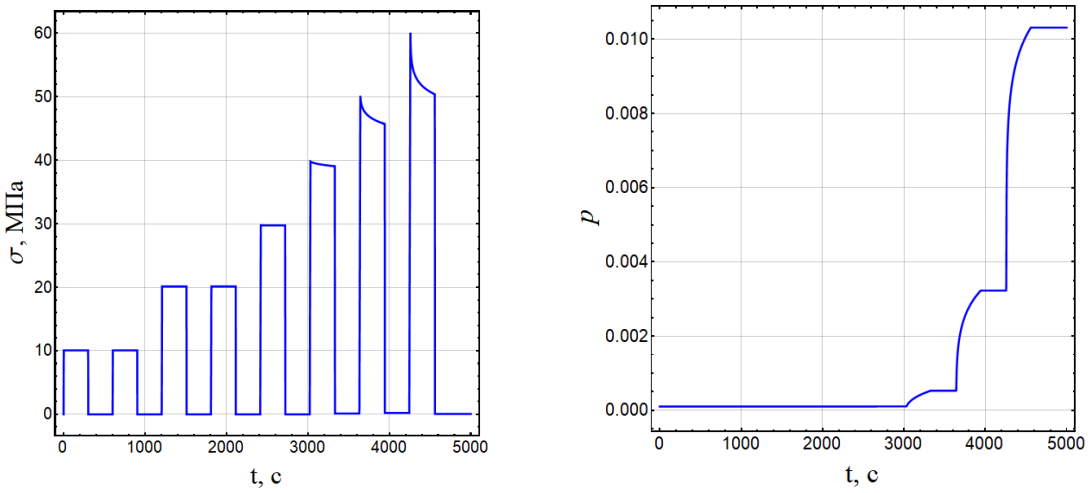
Fig. 9. Distributions of normalized von Mises equivalent strain rates at compressions of 2.7 % (*a*), 5.4 % (*b*), and 10.8 % (*c*)

2.3. Результаты моделирования поведения материала при сложных программах нагружения

Кроме зависимости напряжения течения от скорости деформации, модель (2)–(7) способна качественно описывать специфику поведения материала при сложных программах нагружения. Заметим, что рассматриваемую модель нет возможности откалибровать с учетом каких-либо данных, кроме данных монотонного нагружения. Тем не менее она описывает специфическую релаксацию напряжений в упруговязкопластическом теле (рис. 10, *a*) при нулевой скорости деформации и напряжении выше предела текучести, которая следует из уравнений модели при одноосном нагружении: $\dot{\sigma}/E + \dot{p} = \dot{\varepsilon} = 0$, $\dot{p} \geq 0 \Rightarrow \dot{\sigma} \leq 0$. На рис. 10, *b*, видно, что вязкопластическая деформация в программе копится в течение выдержек при напряжении в вязком элементе выше предела текучести пластического элемента, которое достигается в вязкоупругом контуре реологической схемы (см. рис. 3) при его нагружении с конечной скоростью деформации.

На рис. 11, *a*–*c*, приведен расчет накопления вязкопластических деформаций сжатия в течение 100 отнулевых треугольных циклов нагружения в зависимости от максимального напряжения, повторяющего программу испытаний раздела 2.1. Диаграммы качественно описывают рост деформаций рэтчетинга с повышением максимального напряжения и затухание скорости роста этих деформаций с ростом количества циклов. На рис. 11, *d*, показано накопление в ходе циклического нагружения вязкопластической деформации, которая является аргументом функции деформационного упрочнения пластического элемента реологической модели.

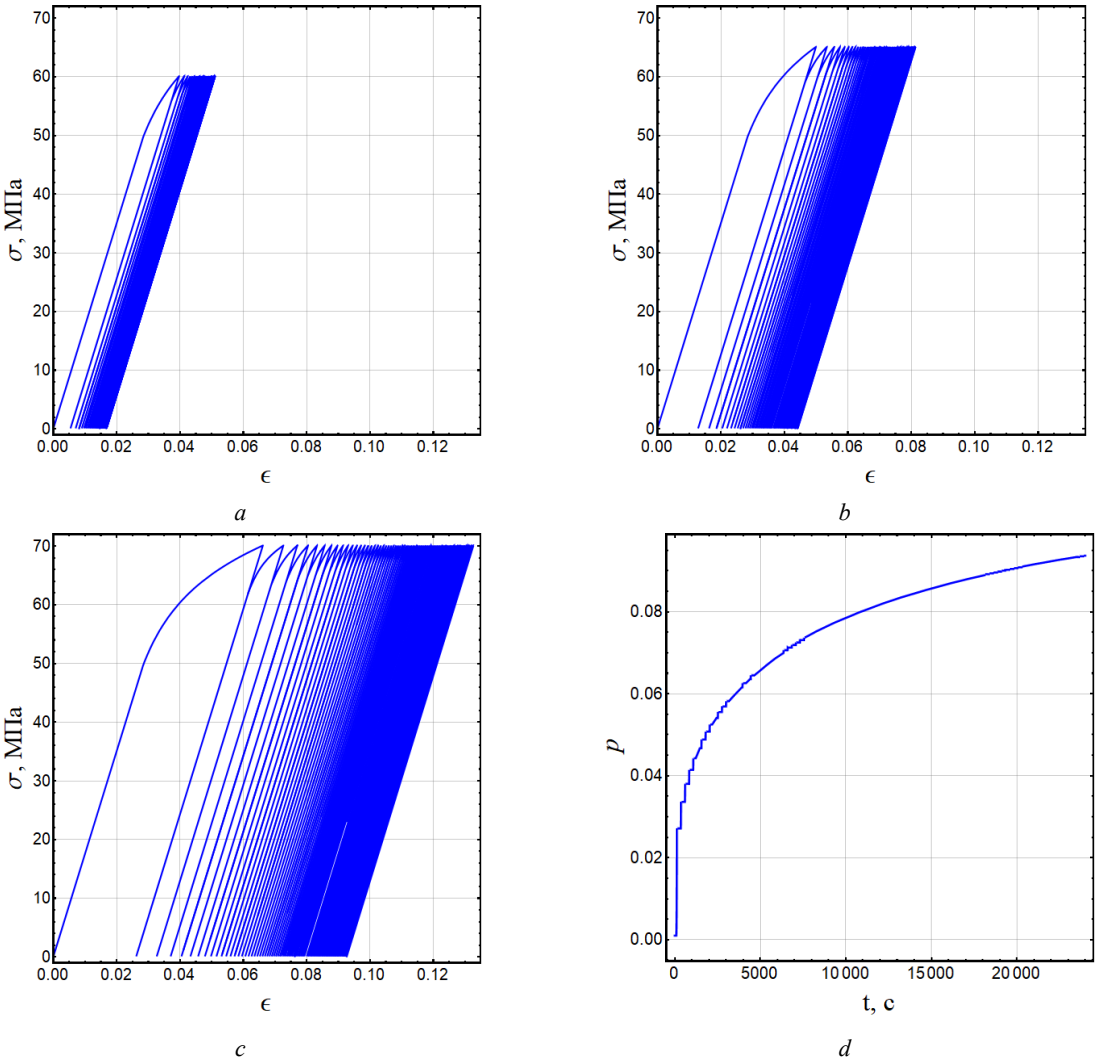
Для более аккуратного описания упруговязкопластического поведения скаффолдов из полилактида в циклических процессах с выдержками, сопровождающих ходьбу человека, очевидно, необходимо рассмотрение более сложных, многоконстантных моделей. Авторы работ [1–3] добиваются этого включением параллельно с вязким элементом эндохронных элементов с различными характерными пластическими деформациями (пластическая обобщенная модель Максвелла).



a *b*

Рис. 10. Изменение напряжения (*a*) и рост вязкопластической деформации (*b*) при ступенчатом нагружении с выдержками

Fig. 10. Stress variation (*a*) and growth of viscoplastic strain (*b*) during stepped loading with holds



a *b* *c* *d*

Рис. 11. Диаграммы 100 отнулевых циклов нагружения сжатием со скоростью 1 мм/мин и максимальным напряжением: 60 МПа (*a*), 65МПа (*b*), 70 МПа (*c*) и рост накопленной вязкопластической деформации (*d*)

Fig. 11. Diagrams of 100 zero-based compression loading cycles at a rate of 1 mm/min with maximum stress of 60 MPa (*a*), 65 MPa (*b*), 70 MPa (*c*), and the accumulation of viscoplastic strain (*d*)

Заключение

Для описания особенностей неоднородного распределения деформаций и напряжений при деформировании скаффолда из полилактида сжатием использована простейшая модель упругопластичности с законом упрочнения Джонсона – Кука, константы которой были определены экспериментально. Обнаружено, что с увеличением деформаций сжатия образца скаффолда от 2,7 до 10,7 % начинает заметно проявляться зависимость пространственного распределения эквивалентных напряжений и скоростей деформаций от скорости деформации сжатия, приложенной к образцу, в диапазоне изменения от $1{,}11\cdot10^{-4}$ до $1{,}11\cdot10^{-1}$ $с^{-1}$. Это показывает важность учета зависимости упруговязкопластических свойств полилактида от скорости деформации для корректного описания локализации пластической деформации и концентрации напряжений, влияющих на микромеханику различных физико-химических и механических процессов в скаффолдах в условиях эксплуатации. Также установлено, что использованная для описания одноосного нагружения модель упругопластичности качественно описывает поведение сплошных образцов полилактида при их нагружении по сложным программам – со ступенчатыми циклами нагружения и разгрузки с выдержками с повышением максимального напряжения, а также ста треугольными отнулевыми циклами нагружения при различных значениях максимального напряжения. Для этого также проведены испытания, обнаружившие релаксацию напряжений на этапах выдержки при превышении напряжения текучести, а также накопление вязкопластических деформаций в циклах (рэтчетинг). Данные эффекты представляются важными для описания деформирования скаффолдов из полилактида в процессах отнулевого циклического нагружения с выдержками при максимальных значениях, повторяющих ходьбу человека. Для корректного количественного описания этих эффектов в полилактиде необходимо рассматривать многоконстантные модели со спектром характерных пластических деформаций. Эти эксперименты и их описание будут представлять собой необходимое развитие настоящего исследования.

Библиографический список

1. Bioimplants for the Reconstructive Surgery and Local Delivery of Chemo-Immunoagents / N.Y. Anisimova, N.S. Martynenko, O.V Rybalchenko [et al.]. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 1–43.
2. Davison, N.L. Degradation of Biomaterials / N.L. Davison, F. Barrère-de Groot, D.W. Grijpma // Tissue Engineering. – Elsevier, 2014. – P. 177–215.
3. Development of Bioactive Scaffolds for Orthopedic Applications by Designing Additively Manufactured Titanium Porous Structures: A Critical Review / M.V. Kiselevskiy, N.Y. Anisimova, A.V. Kapustin [et al.] // Biomimetics. – 2023. – Vol. 8, no. 7. – P. 546.
4. Elenskaya, N. TPMS-based scaffolds: Adaptation of morphological properties and mechanical response to reference tissue / N. Elenskaya, M. Tashkinov, V.V. Silberschmidt // International Journal of Solids and Structures. – 2025. – Vol. 315, no. January. – P. 113366.
5. How does mechanical stimulus affect the coupling process of the scaffold degradation and bone formation: An in silico approach / Q. Shi, H. Shui, Q. Chen, Z.-Y. Li // Computers in Biology and Medicine. – 2020. – Vol. 117. – P. 103588.
6. Experimental Evaluation of the Effect of Degradation on the Mechanical Behavior and Morphometric Characteristics of Functionally Graded Polymer Scaffolds / N. Elenskaya, I. Vindokurov, E. Sadyrin [et al.] // Polymers. – 2024. – Vol. 16, no. 24. – P. 3474.
7. Chaboche, J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories / J. L. Chaboche // International Journal of Plasticity. – 2008. – Vol. 24, no. 10. – P. 1642–1693.
8. Han, C. Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading / C. Han, X. Chen, K.S. Kim // International Journal of Fatigue. – 2002. – Vol. 24, no. 9. – P. 913–922.
9. Abdel-Karim, M. Modified kinematic hardening rules for simulations of ratchetting / M. Abdel-Karim // International Journal of Plasticity. – 2009. – Vol. 25, no. 8. – P. 1560–1587.
10. Самарин, Ю.П. Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами / Ю.П. Самарин. – Куйбышев: Куйбышевский государственный университет, 1979. – 78 p.
11. Kletschkowski, T. Endochronic viscoplastic material models for filled PTFE / T. Kletschkowski, U. Schomburg, A. Bertram // Mechanics of Materials. – 2002. – Vol. 34, no. 12. – P. 795–808.
12. Bergström, J.S. A constitutive model for predicting the large deformation thermomechanical behavior of fluoropolymers / J.S. Bergström, L.B. Hilbert // Mechanics of Materials. – 2005. – Vol. 37, no. 8. – P. 899–913.
13. Petukhov, D.S. Selection and Identification of a Model of Elasto-Viscoplasticity of the Filled Fluorocomposite according to Free and Constrained Compression Tests / D.S. Petukhov, A.A. Adamov, I.E. Keller // Advanced Engineering Research. – 2022. – Vol. 22, no. 3. – P. 180-192.
14. Хохлов, А.В. Особенности поведения вязкоупругопластических материалов, модели и система программ квазистатических испытаний полимеров и композитов для комплексного изучения их свойств и выбора и идентификации определяющих соотношений / А.В. Хохлов // Высокомолекулярные соединения. Серия С. – 2024. – Т. 66, № 2. – P. 157–211.
15. Хохлов, А.В. Анализ общих свойств кривых ползучести при циклических ступенчатых нагружениях, порождаемых линейной теорией наследственности / А.В. Хохлов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2017. – Т. 21, № 2. – P. 326–361.
16. Drozdov, A.D. Cyclic elastoplasticity of solid polymers / A.D. Drozdov, J. de C. Christiansen // Computational Materials Science. – 2008. – Vol. 42, no. 1. – P. 27–35.
17. Menčík, J. Determination of viscoelastic-plastic material parameters of biomaterials by instrumented indentation / J. Menčík, L.H. He, M.V. Swain // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2009. – Vol. 2, no. 4. – P. 318–325.

18. Stan, F. Study of stress relaxation in polytetrafluoroethylene composites by cylindrical macroindentation / F. Stan, C. Fetecau // Composites Part B: Engineering. – 2013. – Vol. 47. – P. 298–307.

19. Stan, F. Viscoelastic characterization of polytetrafluoroethylene (PTFE) polymer by sharp indentation / F. Stan, A.V. Munteanu, C. Fetecau // AIP Conference Proceedings. – 2010. – Vol. 1315. – P. 221–226.

20. Mirkhalaf, S.M. The mechanical behavior of polylactic acid (PLA) films: fabrication, experiments and modelling / S.M. Mirkhalaf, M. Fagerström // Mechanics of Time-Dependent Materials. – 2021. – Vol. 25, no. 2. – P. 119–131.

21. Chen, X. Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression / X. Chen, S. Hui // Polymer Testing. – 2005. – Vol. 24, no. 7. – P. 829–833.

22. Zhang, Z. Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature / Z. Zhang, X. Chen // Polymer Testing. – 2009. – Vol. 28, no. 3. – P. 288–295.

23. Zhang, Z. Uniaxial ratcheting behavior of polytetrafluoroethylene at elevated temperature / Z. Zhang, X. Chen, Y. Wang // Polymer Testing. – 2010. – Vol. 29, no. 3. – P. 352–357.

24. Tensile ratcheting behaviors of bronze powder filled polytetrafluoroethylene / W. Xu, H. Gao, L.L. Gao [et al.] // Frontiers of Chemical Science and Engineering. – 2013. – Vol. 7, no. 1. – P. 103–109.

25. Pruitt, L.A. Deformation, yielding, fracture and fatigue behavior of conventional and highly cross-linked ultra high molecular weight polyethylene / L.A. Pruitt // Biomaterials. – 2005. – Vol. 26, no. 8. – P. 905–915.

26. An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading / M. Shariati, H. Hatami, H. Yarahmadi, H.R. Eipakchi // Materials & Design. – 2012. – Vol. 34. – P. 302–312.

27. In vitro mechanical fatigue behavior of poly-ε-caprolactone macroporous scaffolds for cartilage tissue engineering: Influence of pore filling by a poly(vinyl alcohol) gel / J.A. Panadero, L. Vikingsson, J.L. Gomez Ribelles [et al.] // Journal of Biomedical Materials Research – Part B Applied Biomaterials. – 2015. – Vol. 103, no. 5. – P. 1037–1043.

28. An experimental study on uniaxial ratcheting of polycarbonate polymers with different molecular weights / C. Xi, G. Kang, F. Lu [et al.] // Materials and Design. – 2015. – Vol. 67. – P. 644–648.

29. Rigotti, D. Low-cycle fatigue behavior of flexible 3D printed thermoplastic polyurethane blends for thermal energy storage/release applications / D. Rigotti, A. Dorigato, A. Pegoretti // Journal of Applied Polymer Science. – 2021. – Vol. 138, no. 3. – P. 1–14.

30. Farrokh, B. A strain rate dependent yield criterion for isotropic polymers: Low to high rates of loading / B. Farrokh, A.S. Khan // European Journal of Mechanics, A/Solids. – 2010. – Vol. 29, no. 2. – P. 274–282.

31. Развитие циклической ползучести при блочном нагружении полукристаллического ПЭЭК / А.А. Богданов, С.В. Панин, П.С. Любутин, М.Г. Остапенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2024. – Vol. 67, no. 7. – P. 68–76.

32. Low-cycle fatigue behavior of 3d-printed PLA-based porous scaffolds / F.S. Senatov, K.V. Niaza, A.A. Stepashkin, S.D. Kaloshkin // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Vol. 97. – P. 193–200.

33. The mechanical behavior of poly(lactic acid) unreinforced and nanocomposite films subjected to monotonic and fatigue loading conditions / R.D. Averett, M.L. Realff, K. Jacob [et al.] // Journal of Composite Materials. – 2011. – Vol. 45, no. 26. – P. 2717–2726.

34. Compression of additively manufactured PLA for biomedical applications: Effects of test conditions on properties of solid samples / I. Vindokurov, Y. Pirogova, M. Tashkinov, V.V. Silberschmidt // Polymer Testing. – 2024. – Vol. 130, no. December 2023. – P. 108320.

35. Johnson, G.R. A Constitutive modeling and data for metals subjected to large strain rates and high temperatures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of 7th international symposium on ballistics. – 1983.

36. Triply Periodic Bicontinuous Cubic Microdomain Morphologies by Symmetries / M. Wohlgemuth, N. Yufa, J. Hoffman, E.L. Thomas // Macromolecules. – 2001. – Vol. 34, no. 17. – P. 6083–6089.

37. On strain rate and temperature dependent mechanical properties and constitutive models for additively manufactured polylactic acid (PLA) materials / J. Luo, Q. Luo, G. Zhang [et al.] // Thin-Walled Structures. – 2022. – Vol. 179, no. May. – P. 109624.

38. Rate- and temperature-dependent strain softening in solid polymers / L.C.A. van Breemen, T.A.P. Engels, E.T.J. Klompen [et al.] // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 2012. – Vol. 50, no. 24. – P. 1757–1771.

39. Shear yielding and crazing in dry and wet amorphous PLA at body temperature / H. Chen, Z. Pan, D. Yuan [et al.] // Polymer. – 2023. – Vol. 289. – № September. – P. 126477.

40. Identification of the Cap Model of Elastoplasticity of Non-Compact Media Under Compressive Mean Stress / A.A. Adamov, I.E. Keller, S.G. Zhilin, N.A. Bogdanova // Mechanics of Solids. – 2024. – Vol. 59, no. 4. – P. 1868–1880.

41. Understanding of trabecular-cortical transition zone: Numerical and experimental assessment of multi-morphology scaffolds / N. Elenskaya, M. Tashkinov, I. Vindokurov [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2023. – Vol. 147, no. August. – P. 106146.

42. Design of lattice structures for trabecular-bone scaffolds: comparative analysis of morphology and compressive mechanical behaviour / Y. Pirogova, M. Tashkinov, I. Vindokurov [et al.] // Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. – 2025. – No. 0123456789.

43. Elenskaya, N.V. Numerical Modeling of the Deformation Behavior of Polymer Lattice Structures with a Density Gradient Based on Additive Technologies / N.V. Elenskaya, M.A. Tashkinov, V.V. Silberschmidt // Vestnik St. Petersburg University, Mathematics. – 2022. – Vol. 55, no. 4. – P. 443–452.

References

1. Bioimplants for the Reconstructive Surgery and Local Delivery of Chemo-Immunoagents / N. Y. Anisimova, N. S. Martynenko, O. V Rybalchenko [et al.]. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 1-43.

2. Davison, N. L. Degradation of Biomaterials / N. L. Davison, F. Barrère-de Groot, D. W. Grijpma // Tissue Engineering. – Elsevier, 2014. – P. 177-215.

3. Development of Bioactive Scaffolds for Orthopedic Applications by Designing Additively Manufactured Titanium Porous Structures: A Critical Review / M. V. Kiselevskiy, N. Y. Anisimova, A. V. Kapustin [et al.] // Biomimetics. – 2023. – Vol. 8. – № 7. – P. 546.

4. Elenskaya, N. TPMS-based scaffolds: Adaptation of morphological properties and mechanical response to reference tissue /

N. Elenskaya, M. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // International Journal of Solids and Structures. – 2025. – Vol. 315. – № January. – P. 113366.

5. How does mechanical stimulus affect the coupling process of the scaffold degradation and bone formation: An in silico approach / Q. Shi, H. Shui, Q. Chen, Z.-Y. Li // Computers in Biology and Medicine. – 2020. – Vol. 117. – P. 103588.

6. Experimental Evaluation of the Effect of Degradation on the Mechanical Behavior and Morphometric Characteristics of Functionally Graded Polymer Scaffolds / N. Elenskaya, I. Vindokurov, E. Sadyrin [et al.] // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – № 24. – P. 3474.

7. Chaboche, J. L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories / J. L. Chaboche // International Journal of Plasticity. – 2008. – Vol. 24. – № 10. – P. 1642-1693.

8. Han, C. Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading / C. Han, X. Chen, K. S. Kim // International Journal of Fatigue. – 2002. – Vol. 24. – № 9. – P. 913-922.

9. Abdel-Karim, M. Modified kinematic hardening rules for simulations of ratchetting / M. Abdel-Karim // International Journal of Plasticity. – 2009. – Vol. 25. – № 8. – P. 1560-1587.

10. Samarin, Yu. P. Equations of State for Materials with Complex Rheological Properties / Yu. P. Samarin. – Kuybyshev: Kuybyshev State University, 1979. – 78 p (In Russain).

11. Kletschkowski, T. Endochronic viscoplastic material models for filled PTFE / T. Kletschkowski, U. Schomburg, A. Bertram // Mechanics of Materials. – 2002. – Vol. 34. – № 12. – P. 795-808.

12. Bergström, J. S. A constitutive model for predicting the large deformation thermomechanical behavior of fluoropolymers / J. S. Bergström, L. B. Hilbert // Mechanics of Materials. – 2005. – Vol. 37. – № 8. – P. 899-913.

13. Petukhov, D. S. Selection and Identification of a Model of Elasto-Viscoplasticity of the Filled Fluorocomposite according to Free and Constrained Compression Tests / D. S. Petukhov, A. A. Adamov, I. E. Keller // Advanced Engineering Research. – 2022. – Vol. 22. – № 3. – P. 180-192.

14. Khokhlov, A. V. The Main Features of Viscoelastoplastic Materials Behavior, Models, and the System of Quasi-static Tests for Polymers and Composites aimed at All-round Study of Their Properties and Selection and Identification of Constitutive Equations / A. V. Khokhlov // Vysokomolekulârnye soedineniâ. Seriâ C. – 2024. – Vol. 66. – № 2. – P. 157-211. (In Russain).

15. Khokhlov, A. V. Analysis of creep curves produced by the linear viscoelasticity theory under cyclic stepwise loadings. // Bulletin of Samara State Technical University Series: Physical and Mathematical Sciences/ A. V. Khokhlov. – 2017. – Vol. 21. – P. 326-361. 0123456789 (In Russain).

16. Drozdov, A. D. Cyclic elastoplasticity of solid polymers / A. D. Drozdov, J. de C. Christiansen // Computational Materials Science. – 2008. – Vol. 42. – № 1. – P. 27-35.

17. Menčík, J. Determination of viscoelastic-plastic material parameters of biomaterials by instrumented indentation / J. Menčík, L. H. He, M. V. Swain // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2009. – Vol. 2. – № 4. – P. 318-325.

18. Stan, F. Study of stress relaxation in polytetrafluoroethylene composites by cylindrical macroindentation / F. Stan, C. Fetecau // Composites Part B: Engineering. – 2013. – Vol. 47. – P. 298-307.

19. Stan, F. Viscoelastic characterization of polytetrafluoroethylene (PTFE) polymer by sharp indentation / F. Stan, A. V. Munteanu, C. Fetecau // AIP Conference Proceedings. – 2010. – Vol. 1315. – P. 221-226.

20. Mirkhalaf, S. M. The mechanical behavior of polylactic acid (PLA) films: fabrication, experiments and modelling / S. M. Mirkhalaf, M. Fagerström // Mechanics of Time-Dependent Materials. – 2021. – Vol. 25. – № 2. – P. 119-131.

21. Chen, X. Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression / X. Chen, S. Hui // Polymer Testing. – 2005. – Vol. 24. – № 7. – P. 829-833.

22. Zhang, Z. Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature / Z. Zhang, X. Chen // Polymer Testing. – 2009. – Vol. 28. – № 3. – P. 288-295.

23. Zhang, Z. Uniaxial ratcheting behavior of polytetrafluoroethylene at elevated temperature / Z. Zhang, X. Chen, Y. Wang // Polymer Testing. – 2010. – Vol. 29. – № 3. – P. 352-357.

24. Tensile ratcheting behaviors of bronze powder filled polytetrafluoroethylene / W. Xu, H. Gao, L. L. Gao [et al.] // Frontiers of Chemical Science and Engineering. – 2013. – Vol. 7. – № 1. – P. 103-109.

25. Pruitt, L. A. Deformation, yielding, fracture and fatigue behavior of conventional and highly cross-linked ultra high molecular weight polyethylene / L. A. Pruitt // Biomaterials. – 2005. – Vol. 26. – № 8. – P. 905-915.

26. An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading / M. Shariati, H. Hatami, H. Yarahmadi, H. R. Eipakchi // Materials & Design. – 2012. – Vol. 34. – P. 302-312.

27. In vitro mechanical fatigue behavior of poly-ε-caprolactone macroporous scaffolds for cartilage tissue engineering: Influence of pore filling by a poly(vinyl alcohol) gel / J. A. Panadero, L. Vikingsson, J. L. Gomez Ribelles [et al.] // Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials. – 2015. – Vol. 103. – № 5. – P. 1037-1043.

28. An experimental study on uniaxial ratcheting of polycarbonate polymers with different molecular weights / C. Xi, G. Kang, F. Lu [et al.] // Materials and Design. – 2015. – Vol. 67. – P. 644-648.

29. Rigotti, D. Low-cycle fatigue behavior of flexible 3D printed thermoplastic polyurethane blends for thermal energy storage/release applications / D. Rigotti, A. Dorigato, A. Pegoretti // Journal of Applied Polymer Science. – 2021. – Vol. 138. – № 3. – P. 1-14.

30. Farrokh, B. A strain rate dependent yield criterion for isotropic polymers: Low to high rates of loading / B. Farrokh, A. S. Khan // European Journal of Mechanics, A/Solids. – 2010. – Vol. 29. – № 2. – P. 274-282.

31. Development of cyclic creep under block loading of semi-crystalline peek / A. A. Bogdanov, S. V. Panin, P. S. Lubutin, M. G. Ostapenko // RUSSIAN PHYSICS JOURNAL. – 2024. – Vol. 67. – № 7. – P. 68-76.

32. Low-cycle fatigue behavior of 3d-printed PLA-based porous scaffolds / F. S. Senatov, K. V. Niaza, A. A. Stepashkin, S. D. Kaloshkin // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Vol. 97. – P. 193-200.

33. The mechanical behavior of poly(lactic acid) unreinforced and nanocomposite films subjected to monotonic and fatigue loading conditions / R. D. Averett, M. L. Realff, K. Jacob [et al.] // Journal of Composite Materials. – 2011. – Vol. 45. – № 26. – P. 2717-2726.

34. Compression of additively manufactured PLA for biomedical applications: Effects of test conditions on properties of solid samples / I. Vindokurov, Y. Pirogova, M. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // Polymer Testing. – 2024. – Vol. 130. – № December 2023. – P. 108320.

35. Johnson, G. R. A Constitutive modeling and data for metals subjected to large strain rates and high temperatures /

G. R. Johnson, W. H. Cook // Proceedings of 7th international symposium on ballistics. – 1983.

36. Triply Periodic Bicontinuous Cubic Microdomain Morphologies by Symmetries / M. Wohlgemuth, N. Yufa, J. Hoffman, E. L. Thomas // Macromolecules. – 2001. – Vol. 34. – № 17. – P. 6083-6089.

37. On strain rate and temperature dependent mechanical properties and constitutive models for additively manufactured polylactic acid (PLA) materials / J. Luo, Q. Luo, G. Zhang [et al.] // Thin-Walled Structures. – 2022. – Vol. 179. – № May. – P. 109624.

38. Rate- and temperature-dependent strain softening in solid polymers / L. C. A. van Breemen, T. A. P. Engels, E. T. J. Klompen [et al.] // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 2012. – Vol. 50. – № 24. – P. 1757-1771.

39. Shear yielding and crazing in dry and wet amorphous PLA at body temperature / H. Chen, Z. Pan, D. Yuan [et al.] // Polymer. – 2023. – Vol. 289. – № September. – P. 126477.

40. Identification of the Cap Model of Elastoplasticity of Non-Compact Media Under Compressive Mean Stress / A. A. Adamov, I. E. Keller, S. G. Zhilin, N. A. Bogdanova // Mechanics of Solids. – 2024. – Vol. 59. – № 4. – P. 1868-1880.

41. Understanding of trabecular-cortical transition zone: Numerical and experimental assessment of multi-morphology scaffolds / N. Elenskaya, M. Tashkinov, I. Vindokurov [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2023. – Vol. 147. – № August. – P. 106146.

42. Design of lattice structures for trabecular-bone scaffolds: comparative analysis of morphology and compressive mechanical behaviour / Y. Pirogova, M. Tashkinov, I. Vindokurov [et al.] // Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. – 2025. – № 0123456789.

43. Elenskaya, N. V. Numerical Modeling of the Deformation Behavior of Polymer Lattice Structures with a Density Gradient Based on Additive Technologies / N. V. Elenskaya, M. A. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // Vestnik St. Petersburg University, Mathematics. – 2022. – Vol. 55. – № 4. – P. 443-452.

Финансирование. Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете в рамках Федеральной программы академического лидерства «Приоритет 2030». Разработка программ испытаний образцов и испытания на стесненное и свободное сжатие образцов из материала Raise3D Premium PLA было выполнено в рамках гос. задания по темам Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН N ГР АААА-А20-120022590044-7 (А.А. Адамов).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The research was carried out at Perm National Research Polytechnic University within the framework of the Federal Academic Leadership Program "Priority 2030". The development of sample testing programs and tests for constrained and free compression of samples made of Raise3D Premium PLA material was carried out within the framework of the state assignment on the topics of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences N GR AAAAA-A20-120022590044-7 (A.A. Adamov).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contributions are equal.