

УДК 539.32

# Влияние структурных параметров на физико-механические свойства неоднородных образцов под действием сжимающей нагрузки<sup>\*</sup>

Н.В. Харин, К.Н. Акифьев, К.О. Спиридонова, Д.Э. Хамзин,  
Е.О. Стаценко, П.В. Большаков

Казанский (Приволжский) федеральный университет

## Structural parameters influence on the inhomogeneous sample physical and mechanical properties under the compressive load

N.V. Kharin, K.N. Akifyev, K.O. Spiridonova, D.E. Khamzin,  
E.O. Statsenko, P.V. Bolshakov

Kazan (Volga region) Federal University

Главной особенностью аддитивных технологий является возможность создания неоднородных изделий, состоящих из различных материалов или имеющих неодинаковые свойства в их разных частях. При правильном подходе к проектированию неоднородных структур можно добиться не только уменьшения массы изделия, но и сохранения его прочностных свойств. Однако при нагружении таких структур наблюдается локальное деформирование, которое может негативно сказываться на физико-механических свойствах всего изделия. Рассмотрены изготовленные методом послойного наплавления пористые ячейки, в качестве которых использованы кубические образцы с эллипсоидальной порой с разным углом эллиптичности. Для каждого типа ячеек выполнены три вида натурных испытаний. Первое испытание проводили на одноосное сжатие на испытательной машине, второе — на одноосное сжатие совместно со съемкой образцов в рентгеновском компьютерном томографе на разных этапах нагрузки. На третьем испытании образцы нагружали до пластической деформации в испытательной машине, после чего образец подвергали съемке в рентгеновском компьютерном томографе. Для каждого вида ячеек получены аппроксимирующие кривые для модуля упругости, предела пропорциональности, нижнего и верхнего пределов текучести, а также для структурных параметров на каждом шаге нагружения. При упругих деформациях наблюдалось хаотичное распределение мезопористости, что значительно влияло на значения упругих характеристик. Это количественно сказывалось на коэффициенте детерминации линейной аппроксимации модуля Юнга и предела пропорциональности. Однако при пластических деформациях наблюдалась явная линейная зависимость влияния направления эллиптичности на нижний и верхний пределы текучести.

EDN: TAWURH, <https://elibrary/tawurh>

**Ключевые слова:** компьютерная томография, напряженно-деформированное состояние, пористость образца, неоднородная структура

<sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-21-00274.

The additive technology main feature lies in a possibility to create heterogeneous products consisting of various materials or having different properties in their separate parts. Correct approach to designing the heterogeneous structures makes it possible to achieve not only a decrease in the product mass, but also to preserve its strength properties. However, loading such structures causes its local deformation, which could negatively affect physical and mechanical properties of the entire product. The paper considers porous cells manufactured by the layer-by-layer fusion. In this case, cubic samples were used with an ellipsoidal pore and different ellipticity angle. Three types of full-scale tests were carried out for each cell type. The first test was performed for uniaxial compression on a testing machine, the second — for uniaxial compression accompanied by the sample registration in an X-ray computer tomograph at the loading different stages. The sample in the third test was loaded until plastic deformation in the testing machine; after that the sample was registered in the X-ray computer tomograph. In each cell type, approximating curves were obtained for the elastic modulus, proportionality limit, lower and upper yield points, as well as for the structural parameters at each loading step. Under elastic deformations, mesoporosity chaotic distribution was observed, which significantly affected values of the elastic characteristics. That quantitatively affected the linear approximation determination coefficient of the Young's modulus and the proportionality limit. However, obvious linear dependence of the ellipticity direction influence on the lower and upper yield points was observed under the plastic deformation.

EDN: TAWURH, <https://elibrary/tawurh>

**Keywords:** computer tomography, stress-strain state, sample porosity, inhomogeneous structure

Развитие аддитивных технологий позволило изготавливать конструкции с нерегулярной структурой, а следовательно, и сложные композиционные материалы [1]. Так стало возможным получать изделия со сложной пористой или решетчатой структурой.

Внедрение аддитивных технологий в различные отрасли поставило новую задачу — определение физико-механических свойств и разработка методов моделирования напряженно-деформированного состояния сложно структурированных материалов [2, 3]. Структура таких изделий является неоднородной, что при правильном проектировании может уменьшить массу изделия с сохранением прочностных свойств [4–6].

Конструкции, изготовленные с помощью аддитивных технологий, чаще всего состоят из набора одинаковых базовых ячеек [7, 8]. При проектировании структуры таких изделий необходимо определить геометрические характеристики базовой ячейки, особенности печати и процесс эксплуатации, так как это влияет на физико-механические свойства конструкции [9, 10].

В процессе эксплуатации неоднородных материалов может изменяться внутренняя структура изделия при деформировании [11, 12]. Так, у решетчатой структуры наблюдается локальная потеря устойчивости ребер [13, 14], а у по-

ристой — неравномерность нагружения ввиду технологических или конструктивных особенностей [15, 16].

Деформации в таких структурах оказывают влияние на изменение эффективных физико-механических свойств всей конструкции [17–19]. В некоторых исследованиях показано, что наличие пор может принципиально влиять на изменение физико-механических свойств изделия, в том числе при нагружении. Следовательно, необходимо разработать методику для оценки изменения формы и объема пор под действием внешней нагрузки [3, 20].

Так, было показано, что пористость угольных пород возрастает под действием нагрузки [21]. При этом масштаб пор очень важен, например, если рассматривать мелкомасштабные поры, то пористость может возрастать незначительно [22] или уменьшаться [23].

Схожие результаты получены при анализе минеральных и горных пород [24], где рассматривались образцы под циклической нагрузкой [24, 25].

Для неоднородных конструкций под действием циклической нагрузки установлено [26], что геометрические характеристики элементарных ячеек, пористость и микроархитектура напрямую влияют на механические свойства.

Одним из самых распространенных методов оценки локальных разрушений, изменения

структуры микроархитектуры и геометрических характеристик пор является компьютерная томография (КТ) [27].

Наиболее информативным подходом в этом случае является исследование рентгеновским компьютерным томографом (РКТ) при непосредственном нагружении образца [28, 29]. Микро- и макропористость могут кардинальным образом изменить механические свойства изделия, особенно если пористость возникает на этапе его производства.

Цель работы — оценка влияния геометрических характеристик закрытых пор на физико-механические характеристики под действием внешней сжимающей нагрузки.

В качестве объекта исследования выбран куб с макроскопической закрытой порой. Для оценки изменения внутренней структуры поры, геометрических характеристик образца и появления локальных разрушений использован РКТ.

Проводили исследование изменения внутренней структуры и физико-механических свойств пористых ячеек под нагрузкой. Ячейки представляли собой куб с закрытой эллипсоидальной порой. Рассматривали ячейки восьми типов, имеющих одинаковую пористость. Различие ячеек — направление эллиптичности и формы поры. Каждая ячейка описывалась следующими параметрами: эллиптичность, относительный размер и направление поры.

Ячейки изготавливали методом послойного наплавления (FDM/Fused Deposition Modeling). Для каждого типа ячеек проводили три вида натурных испытаний и получали шесть образцов. Для первого вида испытаний использовали четыре образца, для второго и третьего — по одному образцу.

Первый вид испытаний на одноосное сжатие выполняли на испытательной машине. По полученным результатам — диаграммам нагружения — определяли значения предела пропорциональности, верхнего и нижнего пределов текучести и модуля упругости.

Второй вид испытаний на одноосное сжатие проводили в разработанной установке для сжатия с совместной съемкой образцов в РКТ на разных этапах нагружения. Для каждого этапа нагружения определяли мезо-, макро- и общую пористость образца.

Третий вид испытаний на одноосное сжатие выполняли с помощью испытательной машины и КТ. Образец нагружали одноосным

сжатием на испытательной машине до момента появления пластических деформаций, после чего снимали нагрузку и выполняли КТ-съемку. Определяли мезо-, макро- и общую пористость предварительно нагруженного образца.

**Описание исследуемых образцов.** В качестве пористой ячейки выбран куб с закрытой эллиптической порой (рис. 1). Длина ребра  $h$  пористой ячейки — 20 мм.

Форма поры описывается тремя безразмерными параметрами:  $\lambda$ ,  $\beta$  и  $\varphi$ . Параметр  $\lambda$  определяет отношение наименьшей полуоси  $b$  к наибольшей  $a$ :  $\lambda = b/a$ . Параметр  $\beta$  характеризует относительный размер поры — отношение удвоенной наибольшей полуоси  $2a$  к ребру куба  $h$ :  $\beta = 2a/h$ . Направление поры описывает параметр  $\varphi$  — угол между продольной осью образца (направление нагрузки) и наибольшей полуосью  $a$ . Третья полуось  $c$  принята равной наибольшей полуоси  $a$ .

Безразмерные параметры подбирали так, чтобы итоговое значение пористости  $\phi$  было одинаковым для всех. Шифры и структурные характеристики образцов приведены в табл. 1.

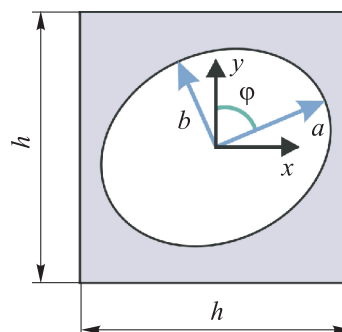


Рис. 1. Структура образца и параметры пористой ячейки

Таблица 1

**Шифры и структурные характеристики образцов**

Шифр образца	$\lambda$	$\beta$	$\varphi$ , град	$\phi$ , %
ЕЕ06	1	0,60	–	11,3
ЕР0	0,54	0,73	0	11,3
ЕР15	0,54	0,73	15	11,3
ЕР30	0,54	0,73	30	11,3
ЕР45	0,54	0,73	45	11,3
ЕР60	0,54	0,73	60	11,3
ЕР75	0,54	0,73	75	11,3
ЕР90	0,54	0,73	90	11,3

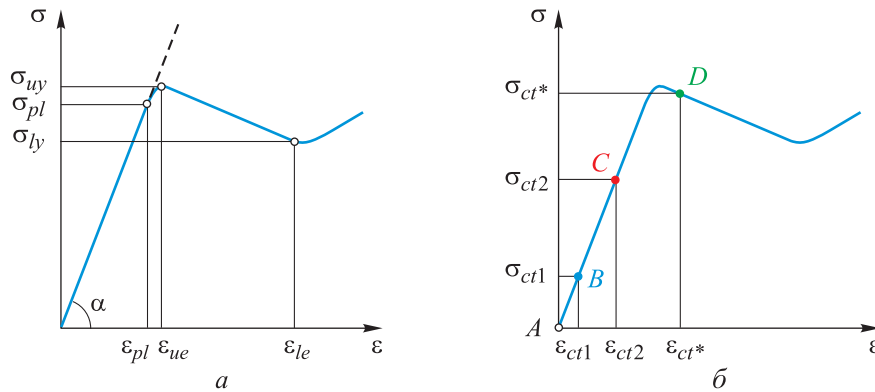


Рис. 2. Диаграммы сжатия образца, полученные с помощью натуральных испытаний (а) и испытания на РКТ (б)

**Испытание на одноосное сжатие.** Спроектированные и напечатанные образцы испытывали под действием внешней одноосной сжимающей нагрузки. Испытание проводили до преодоления нижнего предела текучести. Для анализа полученных результатов использовали диаграмму сжатия образца (рис. 2, а).

В качестве определяемых параметров выступали тангенс угла наклона кривой на линейном участке (модуль Юнга  $E$ ), предел пропорциональности  $\sigma_{pl}$ , верхний  $\sigma_{uy}$  и нижний  $\sigma_{ly}$  пределы текучести.

Для каждого параметра из серии образцов определяли средние значения, проводили линейную аппроксимацию и рассчитывали коэффициент детерминации. Визуализировали полученные распределения параметров с помощью диаграмм размаха.

**Описание испытания на РКТ.** Для исследования пористых ячеек использовали специальную экспериментальную оснастку [30]. Устройство для передачи осевого усилия устанавливали

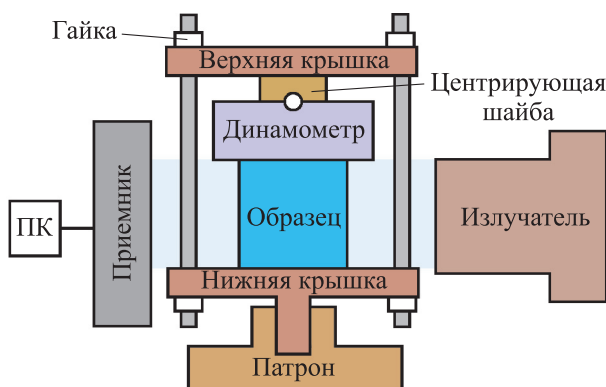


Рис. 3. Устройство для передачи осевого усилия (ПК — персональный компьютер)

нижней крышкой в патрон РКТ (рис. 3). Исследуемый образец располагали между приемником рентгеновского излучения (экраном) и излучателем рентгеновского излучения. Образец помещали между нижней крышкой и динамометром.

Сжимающую осевую нагрузку передавали через центрирующую шайбу путем затягивания гаек на верхней крышке. Для определения сжимающей нагрузки на образец использовали динамометр. Более подробное описание оснастки и принципа ее работы приведено в работах [29, 30].

Съемку образца проводили в свободном состоянии, т. е. без приложения нагрузки и после каждого шага нагружения.

После натуральных испытаний с использованием РКТ определяли напряжения  $\sigma_{ct1}$ ,  $\sigma_{ct2}$  и деформации  $\varepsilon_{ct1}$ ,  $\varepsilon_{ct2}$  на каждом шаге нагружения. Пошаговое нагружение образца выполняли на участке упругих деформаций  $BC$  (рис. 2, б).

Для участка пластических деформаций проводили дополнительный эксперимент (точка  $D$ ). На испытательной машине образцы нагружали до пластических деформаций  $\varepsilon_{ct*}$ , затем их помещали в РКТ.

В процессе производства с помощью метода послойного наплавления между слоями возникали пустоты, влияющие на итоговое значение пористости в образце. Под макропористостью понимали поры, созданные на этапе проектирования (центральная эллиптическая пора), под мезопористостью — поры, полученные во время производства (пустоты между слоями).

Макро-  $\phi_d$  и мезопористость  $\phi_m$  определяли по следующим соотношениям:

$$\phi_d = V_d/V_{all}; \phi_m = V_m/V_{all}.$$

Здесь  $V_d$  и  $V_m$  — объемы макро- и мезопор;  $V_{all}$  — общий объем образца,

$$V_{all} = V_m + V_d + V_s,$$

где  $V_s$  — объем материала.

Общую пористость вычисляли как

$$\phi_{all} = \frac{V_m + V_d}{V_{all}}.$$

**Оборудование.** Для производства образцов применяли 3D-принтер QIDI X-Plus II (толщина слоя печати — 0,2 мм, диаметр сопла — 0,4 мм, скорость печати — 30 мм/мин). Для печати использовали пластик PLA со следующими характеристиками: прочность на растяжение вдоль слоев — 34,8 МПа; модуль упругости при растяжении вдоль слоев — 1,32 ГПа; коэффициент удлинения — 30 %; прочность на сжатие — 77,4 МПа; модуль упругости на сжатие — 2,96 ГПа.

Сканирование образцов выполняли с помощью микро- и нанофокусной системы рентге-

новского контроля для КТ и 2D-инспекции Phoenix V|tome|X S240 в лаборатории рентгеновской компьютерной томографии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

Систему оснащали двумя рентгеновскими трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ, мощностью 320 Вт и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180 кВ, мощностью 15 Вт. Для первичной обработки данных и создания объемной (воксельной) модели образца на базе рентгеновских снимков (проекций) использовали программное обеспечение `datos|x reconstruction`.

Испытание на одноосное сжатие проводили на универсальной испытательной машине УТС-110М-100-0У в лаборатории Института математики и механики Казанского (Приволжского) федерального университета. Наибольшая предельная нагрузка составляла 100 кН, нагрузка — 1...100 кН, рабочая скорость 0,003...350 мм/мин, относительная погрешность измерения нагрузки — 0,5 %, абсолютная погрешность измерения перемещений подвижной тра-

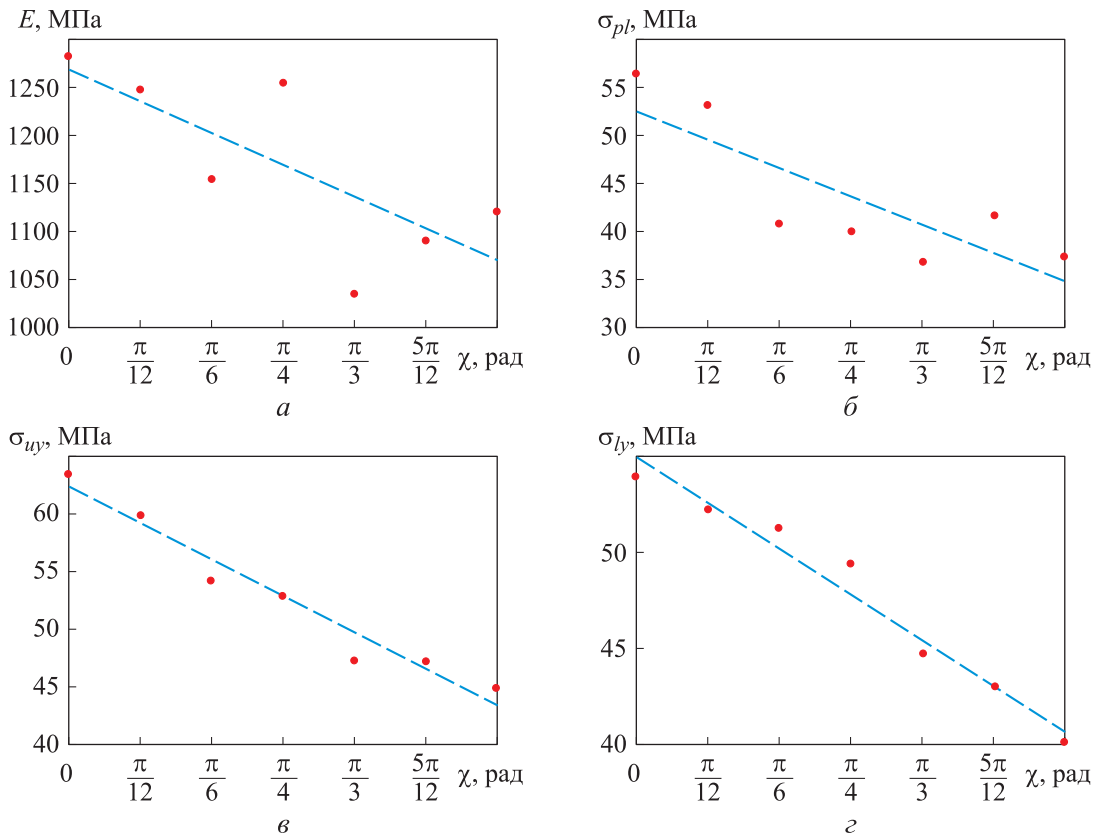


Рис. 4. Расчетные (●) и аппроксимирующие (—) зависимости механических характеристик от угла эллиптичности  $\chi$ : а — модуля Юнга  $E$ ; б — предела пропорциональности  $\sigma_{pl}$ ; в и з — верхнего  $\sigma_{uy}$  и нижнего  $\sigma_{ly}$  пределов текучести

версы — 0,01; 0,1 и 0,5 мм в диапазоне 0,1...50 мм, 50...300 мм и 300...350 мм соответственно. Образцы подвергали осевому сжатию со скоростью нагружения 3 мм/мин.

Для испытания образцов на одноосное сжатие внутри РКТ разработали специальную оснастку [30].

**Результаты. Натурные испытания.** Получены диаграммы нагружения для всех физических объемов. У каждого образца определены модуль упругости, предел пропорциональности, верхний и нижний пределы текучести.

По медианам каждого параметра построена линейная аппроксимация (рис. 4). Для модуля упругости коэффициент детерминации составил 0,57, для предела пропорциональности — 0,69, для нижнего и верхнего пределов текучести 0,97 и 0,95 соответственно.

Значения коэффициентов линейной аппроксимирующей функции  $k$  и  $b$  для механических характеристик приведены в табл. 2.

**Испытания с использованием РКТ.** Испытания с использованием РКТ проведены для образцов EP0, EP45, EP90 и EE06. Значения сжимающей нагрузки на разных шагах нагружения приведены в табл. 3, где ЗПД — зона пластических деформаций;  $P$  — необходимая внешняя сжимающая нагрузка для достижения пластических деформаций.

Объем макропоры у образцов после изготовления, мм<sup>3</sup>: EP06 — 858, EE0 — 884, EE45 —

872, EE90 — 875. Объем мезопор образцов после изготовления, мм<sup>3</sup>: EP06 — 129; EE0 — 201; EE45 — 90; EE90 — 81. Объем материала после изготовления, мм<sup>3</sup>: EP06 — 6648; EE0 — 6705; EE45 — 6820; EE90 — 6688. Общий объем образца после изготовления, мм<sup>3</sup>: EP06 — 7635; EE0 — 7790; EE45 — 7782; EE90 — 7644. Значения объемов и пористости на разных шагах нагружения приведены в табл. 4.

Во всех образцах наблюдалось уменьшение объема макропоры на каждом шаге нагружения. В ЗПД объем макропоры для образца EE0, EE45, EE90, EP06 уменьшился на 3,6; 3,3; 5,3 и 2,1 % соответственно.

У всех образцов, кроме EE90, на первом шаге нагружения объем мезопор увеличивался. На втором шаге нагружения только у образца EE90 наблюдался рост объема мезопор относительно такого для первого шага. В ЗПД объем мезопор у всех образцов оказался на 61 % меньше, чем у образцов после изготовления. В ЗПД мезопоры закрывались.

Объем материала у всех образцов, кроме EE90, на первом шаге нагружения уменьшался, а на втором возвращался к начальному значению. У образца EE90 на первом шаге нагружения объем материала возрастал (3,2 %). Объем материала в ЗПД попарно совпадал у образцов EE45 и EE90, EE0 и EP06.

У образца EE90 на первом шаге нагружения общий объем увеличивался, в то время как у остальных уменьшался. Общий объем на втором шаге нагружения возвращался к исходному для всех образцов.

У всех образцов, кроме EE0, наблюдалось возрастание общего объема при пластической деформации. Общий объем образцов после изготовления и образцов, находящихся под действием пластических деформаций, изменился мало ( $\leq 2,9$  %).

По полученным объемам определяли макро-, мезо- и общую пористость образцов EE45 и EE90, EE0 и EP06. Исходная мезопористость после изготовления физического объема EE0 — 2,58 %. В ходе нагружения у образца EE0 наблюдалось увеличение мезопористости до 3,17 % на первом шаге (см. табл. 4). На втором шаге нагружения мезопористость возвращалась к исходному значению 2,5 %. На участке пластичности мезопористость образца равнялась 0,5 %.

На всем этапе нагружения в РКТ макропористость образца EE0 не изменялась. Исходная

Таблица 2

**Значения коэффициентов линейной аппроксимирующей функции**

Характеристика	$k$	$b$
Модуль упругости	-125,6	1267,6
Предел пропорциональности	-11,4	52,7
Верхний предел текучести	-12,0	62,3
Нижний предел текучести	-9,1	54,8

Таблица 3

**Значения внешней сжимающей нагрузки на разных шагах нагружения**

Шаг нагружения	Нагрузка, Н
0	0
1	1440
2	4320
ЗПД	$P$

Таблица 4

Значения объемов образцов и пористости на разных шагах нагружения

Образец	Шаг нагружения	$V_d$	$V_s$	$V_m$	$V_{all}$	$\Phi_d$	$\Phi_m$	$\Phi_{all}$
		мм <sup>3</sup>				%		
ЕЕ45	0	872	6820	90	7782	11,21	1,16	12,36
	1	870	6736	163	7769	11,20	2,10	13,30
	2	867	6848	79	7794	11,12	1,01	12,14
	ЗПД	843	7022	23	7888	10,69	0,29	10,98
ЕЕ90	0	875	6688	81	7644	11,45	1,06	12,51
	1	872	6906	72	7850	11,11	0,92	12,03
	2	867	6839	92	7798	11,12	1,18	12,30
	ЗПД	829	7014	31	7874	10,53	0,39	10,92
ЕЕ0	0	884	6705	201	7790	11,35	2,58	13,93
	1	883	6639	247	7769	11,37	3,18	14,54
	2	882	6703	195	7780	11,34	2,51	13,84
	ЗПД	852	6861	41	7754	10,99	0,53	11,52
ЕР06	0	858	6648	129	7635	11,24	1,69	12,93
	1	857	6619	147	7623	11,24	1,93	13,17
	2	856	6671	109	7636	11,21	1,43	12,64
	ЗПД	840	6840	31	7711	10,89	0,40	11,30

макропористость составляла 11,34 %, на первом шаге нагружения — 11,36 %, на втором — 11,33 %, при пластических деформациях — 10,9 %. Для всех образцов наблюдалось уменьшение макропористости в ходе нагружения.

Ввиду малого изменения макропористости в ходе нагружения характер изменения общей пористости идентичен таковому мезопористости образца.

У всех образцов, кроме ЕЕ90, мезопористость увеличивалась на первом шаге нагружения и уменьшалась на следующих шагах. У образца ЕЕ90 наблюдалось снижение мезопористости до 0,92 % на первом шаге нагружения и возрастание до 1,18 % на втором.

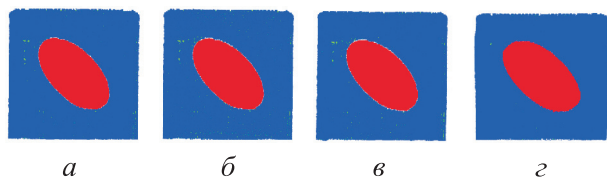


Рис. 5. Модели характерных продольных сечений образца ЕР45 под нагрузкой:  
 а —  $\sigma = 0, \epsilon = 0$ ; б —  $\sigma_{ct1} = 3,6$  МПа;  $\epsilon_{ct1} = 0,010$ ;  
 в —  $\sigma_{ct2} = 10,8$  МПа;  $\epsilon_{ct2} = 0,017$ ;  
 з —  $\sigma_{ct*} = 51,2$  МПа,  $\epsilon_{ct*} = 0,086$

Характерные продольные сечения образца ЕР45 под нагрузкой показаны на рис. 5. Сечения построены на основе данных КТ-снимков, для удобства данные сегментированы: твердая фаза отмечена синим цветом, макропора — красным, мезопоры — зеленым.

**Обсуждение результатов.** Получены аппроксимирующие кривые, описывающие влияние направления эллиптичности на модуль упругости, предел пропорциональности, верхний и нижний пределы текучести (см. рис. 4). Для модуля упругости и предела пропорциональности коэффициент детерминации оказался малым. Тогда как для нижнего и верхнего пределов текучести коэффициент детерминации составлял 0,97 и 0,95 соответственно. Это можно связать с видом деформации (упругой или пластической) и значением мезопористости на рассматриваемом участке.

Для определения модуля упругости и предела пропорциональности рассматривали участок упругих деформаций, где у всех образцов макропористость практически не изменялась и находилась в интервале 11,11...11,45 % при проектировочной пористости 11,3 %.

Наличие мезопористости у образцов негативно сказывалось на их общей пористости. Общая пористость каждого образца составляла 12,03...14,54 % при проектировочной пористости 11,3 %.

При пластических деформациях влияние мезопористости на общую пористость уменьшилось из-за закрытия мезопор. Другими словами, при упругих деформациях хаотичное распределение мезопористости влияет на оценку эффективных упругих механических характеристик. Это влияние снижается в случае перехода образца в ЗПД, что сопровождается почти полным закрытием мезопор. Количественно это показывает снижение коэффициента детерминации для аппроксимации верхнего и нижнего пределов текучести.

Количество мезопор, их размер и форма могут по-разному влиять на физические свойства неоднородных материалов [3, 31]. В работе [3] авторы исследовали эффекты мезопористости образцов гироидной решетчатой структуры, изготовленной методом лазерного плавления. Образцы нагружали как сжимающей, так и циклической нагрузкой. Установлено, что мезопористость, возникающая вследствие технологических особенностей, при пористости 0,2 % не влияет на прочность сжатия и усталостную долговечность.

В статье [20] показано, что у исследуемого образца модуль упругости увеличивался с ростом пористости, а в работе [32] обнаружена связь между уменьшением пористости с соответствующим снижением модуля упругости. Схожие эффекты наблюдались и в проведенном исследовании, где мезопористость составляла 1...4 % и оказывала значительное влияние на значения эффективных упругих механических характеристик.

Наибольший интерес представляют параметры, характеризующие геометрические ха-

рактеристики и количество мезопор, которые незначительно влияют на физико-механические свойства. В данном исследовании объем каждой мезопоры при упругих и пластических деформациях не определяли. Вычисляя объем каждой мезопоры, можно найти среднее значение пористости для всех мезопор при разных деформациях. Эти результаты позволили бы определить такой объем мезопор, который не влияет на физико-механические свойства. В связи с этим запланированы новые эксперименты с разгрузкой образца для нахождения линии разгрузки и модуля Юнга.

Вопрос характера деформаций изделий с мезо- и макропористостью остается открытым, а значит, такие структуры требуют дальнейшего изучения.

## Выводы

1. Для каждого изготовленного типа пористых ячеек проведены три вида натурных испытаний на одноосное сжатие с использованием испытательной машины, РКТ и разработанной оснастки.

2. Получены аппроксимирующие кривые для модуля упругости, предела пропорциональности, нижнего и верхнего пределов текучести. Определены структурные параметры на каждом шаге нагружения — мезо-, макро- и общая пористость — каждой пористой ячейки.

3. При упругих деформациях наблюдалось хаотичное распределение мезопористости, вследствие которой линейная зависимость влияния направления эллиптичности на модуль упругости и предел пропорциональности имеет малый коэффициент детерминации. Однако при пластических деформациях выявлена явная линейная зависимость влияния направления эллиптичности на нижний и верхний пределы текучести.

## Литература

- [1] Lagarrigue P., Oh J., Xie J. et al. Freeze-cast Mg-Fe-CO<sub>3</sub> nano-layered double hydroxide/alginate composite scaffolds for bone substitution: porous architecture and mechanical properties. *Next Materials*, 2024, vol. 3, art. 100147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100147>
- [2] Rstakyan V., Mkhitarian L., Baghdasaryan L. et al. Stereolithography of ceramic scaffolds for bone tissue regeneration: influence of hydroxyapatite/silica ratio on mechanical properties. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 2024, vol. 152, art. 106421, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106421>



- [3] Du Plessis A., Razavi S.M.J., Berto F. The effects of microporosity in struts of gyroid lattice structures produced by laser powder bed fusion. *Mater. Des.*, 2020, vol. 194, art. 108899, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108899>
- [4] Маслов Л.Б., Дмитрюк А.Ю., Жмайло М.А. и др. Исследование прочности эндопротеза тазобедренного сустава из полимерного материала. *Российский журнал биомеханики*, 2022, № 4, с. 19–33.
- [5] Маслов Л.Б., Дмитрюк А.Ю., Жмайло М.А. и др. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния эндопротеза тазобедренного сустава при ходьбе. *Российский журнал биомеханики*, 2021, № 4, с. 414–433.
- [6] Saviour C.M., Gupta S. Design of a functionally graded porous uncemented acetabular component: Influence of polar gradation. *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Engng.*, 2023, vol. 39, no. 6, art. 3709, doi: <https://doi.org/10.1002/cnm.3709>
- [7] Bolshakov P., Raginov I., Egorov V. et al. Design and optimization lattice endoprosthesis for long bones: manufacturing and clinical experiment. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 5, art. 1185, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13051185>
- [8] Bolshakov P., Kharin N., Kashapov R. et al. Structural design method for constructions: simulation, manufacturing and experiment. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 20, art. 6064, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14206064>
- [9] Bahrami Babamiri B., Askari H., Hazeli K. Deformation mechanisms and post-yielding behavior of additively manufactured lattice structures. *Mater. Des.*, 2020, vol. 188, art. 108443, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108443>
- [10] Maconachie T., Leary M., Lozanovski B. et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Mater. Des.*, 2019, vol. 183, art. 108137, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>
- [11] Kharin N., Bolshakov P., Kuchumov A.G. Numerical and experimental study of a lattice structure for orthopedic applications. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2, art. 744, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16020744>
- [12] Zhang X., Zhang K., Zhang B. et al. Mechanical properties of additively-manufactured cellular ceramic structures: a comprehensive study. *J. Adv. Ceram.*, 2022, vol. 11, no. 12, pp. 1918–1931, doi: <https://doi.org/10.1007/s40145-022-0656-5>
- [13] Yuan S., Chua C.K., Zhou K. 3D-printed mechanical metamaterials with high energy absorption. *Adv. Mater. Technol.*, 2019, vol. 4, no. 3, art. 1800419, doi: <https://doi.org/10.1002/admt.201800419>
- [14] Zhang R., Guo R. Voronoi cell finite element model to simulate crack propagation in porous materials. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2021, vol. 115, art. 103045, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103045>
- [15] Jiang Y., Shi K., Zhou L. et al. 3D-printed auxetic-structured intervertebral disc implant for potential treatment of lumbar herniated disc. *Bioact. Mater.*, 2023, vol. 20, pp. 528–538, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.06.002>
- [16] Sandström C., Larsson F., Runesson K. Homogenization of coupled flow and deformation in a porous material. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2016, vol. 308, pp. 535–551, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.05.021>
- [17] Takano N., Fukasawa K., Nishiyabu K. Structural strength prediction for porous titanium based on micro-stress concentration by micro-CT image-based multiscale simulation. *Int. J. Mech. Sci.*, 2010, vol. 52, no. 2, pp. 229–235, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.09.013>
- [18] Zhu L., Li M., Xu W. Direct design to stress mapping for cellular structures. *Vis. Inform.*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 69–80, doi: <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2019.07.002>
- [19] Feng C., Cui Z. A 3-D model for void evolution in viscous materials under large compressive deformation. *Int. J. Plast.*, 2015, vol. 74, pp. 192–212, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.06.012>
- [20] Al-Munajjed A.A., Hien M., Kujat R. et al. Influence of pore size on tensile strength, permeability and porosity of hyaluronan-collagen scaffolds. *J. Mater. Sci.: Mater. Med.*, 2008, vol. 19, no. 8, pp. 2859–2864, doi: <https://doi.org/10.1007/s10856-008-3422-5>
- [21] Xin T., Liang B., Wang J. et al. Experimental study on the evolution trend of the pore structure and the permeability of coal under cyclic loading and unloading. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, no. 51, pp. 35830–35843, doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06118>

- [22] Zhang M., Sun H., Song C. et al. Pores evolution of soft clay under loading/unloading process. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, no. 23, art. 8468, doi: <https://doi.org/10.3390/app10238468>
- [23] Duan B., Shen T., Wang D. Effects of solid loading on pore structure and properties of porous FeAl intermetallics by gel casting. *Powder Technol.*, 2019, vol. 344, pp. 169–176, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.019>
- [24] Sun J., Dong Z., Zhu S. et al. Pore structure evolution of mudstone caprock under cyclic load-unload and its influence on breakthrough pressure. *Front. Earth Sci.*, 2023, vol. 17, no. 3, pp. 691–700, doi: <https://doi.org/10.1007/s11707-022-1019-9>
- [25] Diederichs A.M., Thiel F., Lienert U. et al. In-situ investigations of structural changes during cyclic loading by high resolution reciprocal space mapping. *Procedia Struct. Integr.*, 2017, vol. 7, pp. 268–274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.088>
- [26] Baptista R., Guedes M. Porosity and pore design influence on fatigue behavior of 3D printed scaffolds for trabecular bone replacement. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 2021, vol. 117, art. 7104378, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104378>
- [27] Le V.-D., Pessard E., Morel F. et al. Fatigue behaviour of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy: the role of defects on scatter and statistical size effect. *Int. J. Fatigue*, 2020, vol. 140, art. 105811, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105811>
- [28] Wang B., Sun L., Pan B. Mapping internal deformation fields in 3D printed porous structure with digital volume correlation. *Polym. Testing*, 2019, vol. 78, art. 105945, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105945>
- [29] Акифьев К.Н., Стаценко Е.О., Смирнова В.В. и др. Методика исследования пористости образцов с жидкостью рентгеновским компьютерным томографом при одноосном сжатии. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2023, № 2, с. 11–21.
- [30] Саченков О.А., Большаков П.В., Герасимов О.В. и др. Устройство для определения структуры материала или образцов при одноосном сжатии и способ его использования. Патент RU 2755098. Заявл. 12.02.2021, опубл. 13.09.2021.
- [31] Cai C., Song B., Xue P. et al. Effect of hot isostatic pressing procedure on performance of Ti6Al4V: surface qualities, microstructure and mechanical properties. *J. Alloys Compd.*, 2016, vol. 686, pp. 55–63, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.280>
- [32] Kanwar S., Al-Ketan O., Vijayavenkataraman S. A novel method to design biomimetic, 3D printable stochastic scaffolds with controlled porosity for bone tissue engineering. *Mater. Des.*, 2022, vol. 220, art. 110857, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110857>

## References

- [1] Lagarrigue P., Oh J., Xie J. et al. Freeze-cast Mg-Fe-CO<sub>3</sub> nano-layered double hydroxide/alginate composite scaffolds for bone substitution: porous architecture and mechanical properties. *Next Materials*, 2024, vol. 3, art. 100147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2024.100147>
- [2] Rstakyan V., Mkhitarian L., Baghdasaryan L. et al. Stereolithography of ceramic scaffolds for bone tissue regeneration: influence of hydroxyapatite/silica ratio on mechanical properties. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 2024, vol. 152, art. 106421, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106421>
- [3] Du Plessis A., Razavi S.M.J., Berto F. The effects of microporosity in struts of gyroid lattice structures produced by laser powder bed fusion. *Mater. Des.*, 2020, vol. 194, art. 108899, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108899>
- [4] Maslov L.B., Dmitryuk A.Yu., Zhmaylo M.A. et al. Study of the strength of a hip endoprosthesis made of polymeric material. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* [Russian Journal of Biomechanics], 2022, no. 4, pp. 19–33. (In Russ.).
- [5] Maslov L.B., Dmitryuk A.Yu., Zhmaylo M.A. et al. Finite element analysis of the stress state of the hip joint endoprosthesis while walking. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* [Russian Journal of Biomechanics], 2021, no. 4, pp. 414–433. (In Russ.).
- [6] Saviour C.M., Gupta S. Design of a functionally graded porous uncemented acetabular component: Influence of polar gradation. *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Engng.*, 2023, vol. 39, no. 6, art. 3709, doi: <https://doi.org/10.1002/cnm.3709>

- [7] Bolshakov P., Raginov I., Egorov V. et al. Design and optimization lattice endoprosthesis for long bones: manufacturing and clinical experiment. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 5, art. 1185, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13051185>
- [8] Bolshakov P., Kharin N., Kashapov R. et al. Structural design method for constructions: simulation, manufacturing and experiment. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 20, art. 6064, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14206064>
- [9] Bahrami Babamiri B., Askari H., Hazeli K. Deformation mechanisms and post-yielding behavior of additively manufactured lattice structures. *Mater. Des.*, 2020, vol. 188, art. 108443, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108443>
- [10] Maconachie T., Leary M., Lozanovski B. et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Mater. Des.*, 2019, vol. 183, art. 108137, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>
- [11] Kharin N., Bolshakov P., Kuchumov A.G. Numerical and experimental study of a lattice structure for orthopedic applications. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2, art. 744, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16020744>
- [12] Zhang X., Zhang K., Zhang B. et al. Mechanical properties of additively-manufactured cellular ceramic structures: a comprehensive study. *J. Adv. Ceram.*, 2022, vol. 11, no. 12, pp. 1918–1931, doi: <https://doi.org/10.1007/s40145-022-0656-5>
- [13] Yuan S., Chua C.K., Zhou K. 3D-printed mechanical metamaterials with high energy absorption. *Adv. Mater. Technol.*, 2019, vol. 4, no. 3, art. 1800419, doi: <https://doi.org/10.1002/admt.201800419>
- [14] Zhang R., Guo R. Voronoi cell finite element model to simulate crack propagation in porous materials. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2021, vol. 115, art. 103045, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103045>
- [15] Jiang Y., Shi K., Zhou L. et al. 3D-printed auxetic-structured intervertebral disc implant for potential treatment of lumbar herniated disc. *Bioact. Mater.*, 2023, vol. 20, pp. 528–538, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.06.002>
- [16] Sandström C., Larsson F., Runesson K. Homogenization of coupled flow and deformation in a porous material. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2016, vol. 308, pp. 535–551, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.05.021>
- [17] Takano N., Fukasawa K., Nishiyabu K. Structural strength prediction for porous titanium based on micro-stress concentration by micro-CT image-based multiscale simulation. *Int. J. Mech. Sci.*, 2010, vol. 52, no. 2, pp. 229–235, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.09.013>
- [18] Zhu L., Li M., Xu W. Direct design to stress mapping for cellular structures. *Vis. Inform.*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 69–80, doi: <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2019.07.002>
- [19] Feng C., Cui Z. A 3-D model for void evolution in viscous materials under large compressive deformation. *Int. J. Plast.*, 2015, vol. 74, pp. 192–212, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.06.012>
- [20] Al-Munajjed A.A., Hien M., Kujat R. et al. Influence of pore size on tensile strength, permeability and porosity of hyaluronan-collagen scaffolds. *J. Mater. Sci.: Mater. Med.*, 2008, vol. 19, no. 8, pp. 2859–2864, doi: <https://doi.org/10.1007/s10856-008-3422-5>
- [21] Xin T., Liang B., Wang J. et al. Experimental study on the evolution trend of the pore structure and the permeability of coal under cyclic loading and unloading. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, no. 51, pp. 35830–35843, doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06118>
- [22] Zhang M., Sun H., Song C. et al. Pores evolution of soft clay under loading/unloading process. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, no. 23, art. 8468, doi: <https://doi.org/10.3390/app10238468>
- [23] Duan B., Shen T., Wang D. Effects of solid loading on pore structure and properties of porous FeAl intermetallics by gel casting. *Powder Technol.*, 2019, vol. 344, pp. 169–176, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.019>
- [24] Sun J., Dong Z., Zhu S. et al. Pore structure evolution of mudstone caprock under cyclic load-unload and its influence on breakthrough pressure. *Front. Earth Sci.*, 2023, vol. 17, no. 3, pp. 691–700, doi: <https://doi.org/10.1007/s11707-022-1019-9>
- [25] Diederichs A.M., Thiel F., Lienert U. et al. In-situ investigations of structural changes during cyclic loading by high resolution reciprocal space mapping. *Procedia Struct. Integr.*, 2017, vol. 7, pp. 268–274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.088>

- [26] Baptista R., Guedes M. Porosity and pore design influence on fatigue behavior of 3D printed scaffolds for trabecular bone replacement. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 2021, vol. 117, art. 7104378, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104378>
- [27] Le V.-D., Pessard E., Morel F. et al. Fatigue behaviour of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy: the role of defects on scatter and statistical size effect. *Int. J. Fatigue*, 2020, vol. 140, art. 105811, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105811>
- [28] Wang B., Sun L., Pan B. Mapping internal deformation fields in 3D printed porous structure with digital volume correlation. *Polym. Testing*, 2019, vol. 78, art. 105945, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105945>
- [29] Akifyev K.N., Statsenko E.O., Smirnova V.V. et al. Method for studying the porosity of fluid phase samples by x-ray computed tomography under uniaxial compression. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2023, no. 2, pp. 11–21. (In Russ.).
- [30] Sachenkov O.A., Bolshakov P.V., Gerasimov O.V. et al. *Ustroystvo dlya opredeleniya struktury materiala ili obraztsov pri odnoosnom szhatii i sposob ego ispolzovaniya* [Device for determining the structure of a material or samples under uniaxial compression and method for its use]. Patent RU 2755098. Appl. 12.02.2021, publ. 13.09.2021. (In Russ.).
- [31] Cai C., Song B., Xue P. et al. Effect of hot isostatic pressing procedure on performance of Ti6Al4V: surface qualities, microstructure and mechanical properties. *J. Alloys Compd.*, 2016, vol. 686, pp. 55–63, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.280>
- [32] Kanwar S., Al-Ketan O., Vijayavenkataraman S. A novel method to design biomimetic, 3D printable stochastic scaffolds with controlled porosity for bone tissue engineering. *Mater. Des.*, 2022, vol. 220, art. 110857, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110857>

Статья поступила в редакцию 02.05.2024

## Информация об авторах

**ХАРИН Никита Вячеславович** — младший научный сотрудник лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева. Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: [nik1314@mail.ru](mailto:nik1314@mail.ru)).

**АКИФЬЕВ Кирилл Николаевич** — лаборант-исследователь лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева. Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: [kirill.akifyev@mail.ru](mailto:kirill.akifyev@mail.ru)).

**СПИРИДОНОВА Ксения Олеговна** — лаборант-исследователь лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева. Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: [severys2002@mail.ru](mailto:severys2002@mail.ru)).

**ХАМЗИН Данил Эльмирович** — лаборант-исследователь лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева. Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: [kde1260@gmail.com](mailto:kde1260@gmail.com)).

## Information about the authors

**KHARIN Nikita Vyacheslavovich** — Junior Researcher, Laboratory of Shell Mechanics, SRC SRIMM named after N.G. Chebotarev. Kazan Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, Kremlyovskaya St., Bldg. 18, e-mail: [nik1314@mail.ru](mailto:nik1314@mail.ru)).

**AKIFIEV Kirill Nikolaevich** — Laboratory Researcher, Laboratory of Shell Mechanics, SRC SRIMM named after N.G. Chebotarev. Kazan Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, Kremlyovskaya St., Bldg. 18, e-mail: [kirill.akifyev@mail.ru](mailto:kirill.akifyev@mail.ru)).

**SPIRIDONOVA Ksenia Olegovna** — Laboratory Researcher, Laboratory of Shell Mechanics, SRC SRIMM named after N.G. Chebotarev. Kazan Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, Kremlyovskaya St., Bldg. 18, e-mail: [severys2002@mail.ru](mailto:severys2002@mail.ru)).

**KHAMZIN Danil Elmirovich** — Laboratory Researcher, Laboratory of Shell Mechanics, SRC SRIMM named after N.G. Chebotarev. Kazan Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, st. Kremlin, 18, e-mail: [kde1260@gmail.com](mailto:kde1260@gmail.com)).

**СТАЦЕНКО Евгений Олегович** — младший научный сотрудник лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева. Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: e.statsenko@yahoo.com).

**STATSENKO Evgeniy Olegovich** — Junior Researcher, Laboratory of Shell Mechanics, SRC SRIMM named after N.G. Chebotarev. Kazan Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, Kremlyovskaya St., Bldg. 18, e-mail: e.statsenko@yahoo.com).

**БОЛЬШАКОВ Павел Владиславович** — младший научный сотрудник лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева. Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: bolshakov-pavel@inbox.ru).

**BOLSHAKOV Pavel Vladislavovich** — Junior Researcher, Laboratory of Shell Mechanics, SRC SRIMM named after N.G. Chebotarev. Kazan Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, Kremlyovskaya St., Bldg. 18, e-mail: bolshakov-pavel@inbox.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Харин Н.В., Акифьев К.Н., Спиридонова К.О., Хамзин Д.Э., Стаценко Е.О., Большаков П.В. Влияние структурных параметров на физико-механические свойства неоднородных образцов под действием сжимающей нагрузки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 8, с. 11–23.

**Please cite this article in English as:**

Kharin N.V., Akifyev K.N., Spiridonova K.O., Khamzin D.E., Statsenko E.O., Bolshakov P.V. Structural parameters influence on the inhomogeneous sample physical and mechanical properties under the compressive load. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 8, pp. 11–23.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям учебное пособие  
«Автоматическое управление  
теплоэнергетическими установками»**

**Авторы: А.Г. Кузнецов, С.В. Харитонов**

Рассмотрены вопросы автоматического управления и регулирования применительно к теплоэнергетическим установкам: тепловым двигателям, компрессорам, детандерам, теплообменным аппаратам, трубопроводам и др. Материал изложен в последовательности, принятой при изучении теории управления и регулирования. Наряду со ставшими уже классическими основами теории управления и регулирования приведен актуальный для современных систем управления с электронными блоками материал по законам регулирования, методам настройки контроллеров, использованию нейронных сетей. Рассмотрены примеры, в которых с помощью цифрового моделирования иллюстрируются результаты теоретического анализа и синтеза систем управления применительно к теплоэнергетическим установкам.

Для специалистов и студентов в области теплоэнергетики, изучающих дисциплину «Управление техническими системами».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>