

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ОБРАЗЦА С ФЛЮИД НАСЫЩЕННЫМИ ЗАКРЫТЫМИ ПОРАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Н.В. Харин

К.Н. Акифьев

Е.О. Стаценко

Е.В. Семенова

О.А. Саченков

П.В. Большаков

nik1314@mail.ru

kirill.akifyev@mail.ru

e.statsenko@yahoo.com

elena.semionova2011@rambler.ru

4works@bk.ru

bolshakov-pavel@inbox.ru

КФУ, Казань, Российская Федерация

---

### Аннотация

Современные производственные возможности позволяют создавать конструкции с нерегулярной и неоднородной структурой. При эксплуатации таких конструкций возникают особенности, связанные с изменением внутренней структуры при деформировании. К таким изменениям относят локальное разрушение и изменение структуры основного скелета, а эти эффекты негативно влияют на физико-механические свойства. Объект исследования — образцы с флюид насыщенными порами. Флюид в закрытых порах появлялся вследствие закупоривания фотополимерной смолы во время лазерной стереолитографии. Сканирование образцов проводилось с использованием рентгеновского компьютерного томографа без внешней нагрузки и с разной сжимающей продольной нагрузкой. Рассмотрены четыре образца с одинаковой пористостью, но с различной геометрией пор. Показано, что пористость, объемная деформация, относительная пористость ведут себя нелинейно в зависимости от внешней сжимающей нагрузки. Для всех образцов наблюдалось увеличение пористости при нагружении. Так, максимальное увеличение пористости для эллипсоидальной поры составило 25 %, а для сфероидальной — 50 %. Результаты свидетельствуют о влиянии геометрии поры на пористость под действием сжимающей нагрузки

### Ключевые слова

Компьютерная томография, напряженно-деформированное состояние, пористость, эксперимент, закрытые поры, флюид насыщенные поры

Поступила 22.08.2023

Принята 10.01.2024

© Автор(ы), 2024

---

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект РФФ № 23-21-00274)*

**Введение.** Современные производственные возможности, в том числе развитие аддитивных технологий, позволяют производить изделия нерегулярной геометрии из сложных композиционных материалов. В то же время возникают задачи описания напряженно-деформированного состояния неоднородных материалов для проектировочных и проверочных расчетов изделий. При этом аддитивные технологии открывают большие возможности и для исследования образцов со сложной внутренней структурой. Так, можно изготовить неоднородную (пористую или решетчатую) внутреннюю структуру, которую невозможно создать с использованием субтрактивного производства. Такие структуры находят все большее применение в отраслях. Например, в области протезирования аддитивные технологии позволяют не только спроектировать персонализированный эндопротез или имплант, но и ускорить рост костной ткани с использованием новых материалов, применяемых при 3D-печати, за счет добавления фармакологического агента к химическому составу материала. Структура индивидуализированных имплантов является неоднородной, что позволяет, с одной стороны, уменьшить массу изделия, а с другой — сохранить его прочностные свойства [1–3]. Зачастую геометрия такого импланта состоит из набора идентичных элементарных ячеек, которые и описывают структуру [4, 5]. Так, при проектировании структуры импланта необходимо учитывать геометрические параметры элементарной ячейки, дефекты печати и процесс эксплуатации, поскольку это влияет на эксплуатационные свойства конструкции [6, 7]. Много исследований посвящено влиянию геометрических параметров элементарной ячейки на напряженно-деформированное состояние [8–10].

Следует отметить тот факт, что в процессе нагружения таких неоднородных материалов могут возникать особенности, связанные с изменением внутренней структуры исследуемого образца при деформировании [11, 12]. Пористые и сетчатые материалы имеют свойство локально разрушаться [13, 14], что приводит к неравномерному деформированию, релаксации во внутренней области и к прямому изменению физико-механических свойств на макроскопическом уровне [15]. У пористых конструкций в результате деформирования на определенном шаге нагружения одна область может быть менее нагруженной, чем другая [16, 17]. В результате в мало-нагруженной области поры остаются открытыми, а в более нагруженной — поры могут разрушаться или закрываться, что также влияет на упругие и прочностные свойства изделия [18, 19].

Зависимости модуля упругости и максимальных напряжений от масштаба пор представлены в [20]. Были проведены натурные эксперименты на растяжение гиалуроново-коллагеновых каркасов с тремя различными

масштабами пористости. Полученные зависимости показывают увеличение максимальных разрушающих напряжений, а также жесткости каркаса при увеличении масштаба пор, что на первый взгляд неочевидно. Следовательно, если объем поры меняется при нагружении, то это может привести к принципиальному изменению механических свойств образца. Отсюда возникает вопрос оценки изменения формы, объема пор под действием внешней нагрузки. Так, некоторые авторы показали, что у образцов из угля пористость возрастает под действием внешней нагрузки [21]. Для мелко-масштабных пор эти эффекты менее значительны [22] или несут ожидаемый характер — пористость уменьшается [23]. Большинство исследований проводятся для минеральных и горных пород [24], а внешним воздействием чаще всего является циклическая нагрузка [24, 25].

Показано, что модуль упругости при циклической нагрузке неоднородных конструкций зависит от геометрии элементарной ячейки и ее пористости [26]. Продемонстрирована зависимость модуля упругости от цикла нагружения для двух видов элементарных ячеек и трех значений пористости 30, 50 и 70 %. Полученные результаты показали, что на механические свойства влияет не только пористость, но и ее микроархитектура.

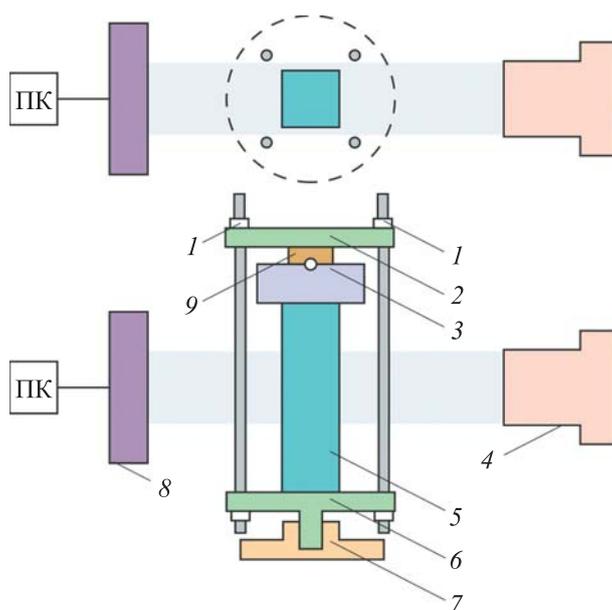
Одним из наиболее распространенных методов оценки локальных разрушений, структуры микроархитектуры и геометрии пор является компьютерная томография [27]. В этом случае наиболее информативный подход — исследование рентгеновским компьютерным томографом при непосредственном нагружении образца [28, 29].

Описанные результаты формируют важный вопрос исследования изменения геометрии пор под действием нагрузки, что в свою очередь влечет к изменению напряженно-деформированного состояния. *Цель работы* — исследование геометрии закрытых пор под действием внешнего воздействия. В работе исследованы макроскопические закрытые поры, наполненные жидкостью, под действием статической сжимающей нагрузки. Для оценки изменения геометрии пор использована рентгеновская компьютерная томография.

**Материалы и методы решения задач, принятые допущения.** *Описание работы.* Проведено экспериментальное исследование образцов с флюид насыщенными порами. Образцы нагружались сжимающей силой в продольном направлении. С помощью авторской методики исследованы структурные изменения пористых образцов под действием внешней нагрузки. Исследование выполнено для каждого образца в свободном состоянии и в трех точках нагружения с использованием рентгеновской компьютерной томографии (РКТ).

Перед испытанием на исследуемые образцы наклеивалась регулярная ортогональная сетка из медной проволоки диаметром 90 мкм. Выбор материала сетки обусловлен условием контрастности в рентгеновском излучении, малый диаметр поперечного сечения позволяет исключить жесткость материала сетки при нагружении. Образец устанавливался в испытательное устройство, которое монтировалось в рентгеновский компьютерный томограф, где и происходила съемка. При обработке данных сетка использовалась для построения реперных точек.

*Описание устройства.* Для исследования образцов использована специальная экспериментальная оснастка. Устройство для передачи осевой нагрузки устанавливалось нижней крышкой в патрон томографа 7 (рис. 1). Исследуемый образец находился между приемником рентгеновского излучения (экраном) 8 и излучателем рентгеновского излучения 4. Образец 5 помещался между нижней крышкой 6 и динамометром 3.



**Рис. 1.** Устройство для передачи осевой нагрузки:

- 1 — гайки; 2 — верхняя крышка; 3 — динамометр; 4 — излучатель рентгеновского излучения; 5 — испытуемый образец; 6 — нижняя крышка; 7 — патрон томографа; 8 — приемник рентгеновского излучения; 9 — центровочная шайба с шариком

Сжимающая осевая нагрузка передавалась через шайбу и центровочный шарик 9 с помощью затягивания гаек 1 на верхней крышке 2. Динамометром определялась сжимающая нагрузка на образец. Съемка образца проводилась в свободном состоянии, т. е. без приложения нагрузки и после

каждого шага нагружения. Более подробное описание оснастки и принципа ее работы приведено в [29, 30].

*Описание проведения эксперимента.* В рамках исследования изготовлены четыре образца. Все образцы получены с использованием лазерной стереолитографии. Образцы представляли собой параллелепипед, состоящий из равномерно распределенных кубических физических объемов. Каждый физический объем описывался параметрами: пористость, форма и направление поры.

Перед натурными испытаниями на образец наклеивалась медная сетка. Затем образец устанавливался в описанную выше установку и помещался в рентгеновский компьютерный томограф. Каждый образец подвергался сканированию четыре раза. Первое сканирование заключалось в получении компьютерной модели до деформации образца, последующие три проводились после поэтапного нагружения образца. На каждом этапе нагружения сжимающая осевая сила увеличивалась.

Сканирование образцов выполнено с применением микронанофокусной системы рентгеновского контроля для компьютерной томографии и 2D-инспекции *Phoenix V|tome|X S240* в лаборатории рентгеновской компьютерной томографии Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ. Система оснащена двумя рентгеновскими трубками: 1) микрофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ, мощностью 320 Вт; 2) 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) использовалось программное обеспечение *Datos|x reconstruction*.

После проведения испытаний для каждого образца и каждого шага нагружения получены данные распределения коэффициентов рентгеновского ослабления. Каждый файл с данными маркировался шифром образца и приложенной внешней нагрузкой.

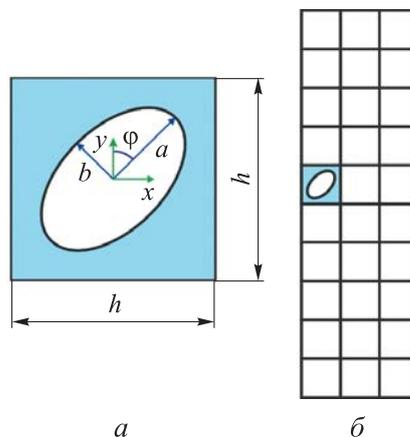
**Описание исследуемых образцов.** *Геометрия исследуемых образцов.* Образцы состояли из равномерно распределенных идентичных кубических физических объемов, внутри которых была помещена закрытая пора (рис. 2). Геометрия закрытой поры — эллипсоид с двумя полуосями  $a$  и полуосью  $b$ . Образец состоял из  $10 \times 3 \times 3$  физических объемов. Длина ребра кубического физического объема 8 мм.

Геометрия поры описывалась тремя безразмерными параметрами  $\lambda$ ,  $\beta$  и  $\varphi$ . Параметр  $\lambda$  — отношение наименьшей полуоси ( $b$ ) к наибольшей ( $a$ ). Параметр  $\beta$  — относительный размер поры, а именно, отношение удвоенной наибольшей полуоси ( $2a$ ) к ребру куба ( $h$ ). Параметр  $\varphi$  —

**Рис. 2.** Параметры физического объема (а) и структура образца (б)

направление поры — угол между продольной осью образца и наибольшей полуосью  $a$ .

Для заданных безразмерных параметров рассчитаны объемы пор и пористость  $\rho$ . Параметры подбирались так, чтобы пористость у всех образцов была одинаковой. Параметры проектируемых образцов приведены в таблице.



**Шифры и структурные параметры образцов,  $\rho_0 = 11,3\%$**

Шифр образца	$\lambda$	$\beta$	$\phi$ , град
EP06	1,0	0,6	0
EE0	0,54	0,73	0
EE45			45
EE90			90

*Изготовление исследуемых образцов.* Исследуемые образцы изготавливались методом лазерной стереолитографии на фотополимерном принтере Anycubic Photon Mono X. В работе использована фотополимерная смола Anycubic Colored UV Resin, характеристики которой приведены ниже (толщина печати 10 мкм):

Длина волны отверждения, нм .....	405
Вязкость, МПа · с .....	552
Плотность в состоянии, г/см <sup>3</sup> :	
жидком .....	1000
твердом .....	1184
Твердость по Шору, D .....	79
Удлинение при разрыве, % .....	14,2
Точность по оси z, мм .....	0,01
Прочность на растяжение, МПа .....	23,4

**Обработка данных.** *Определение перемещений поверхностной сетки.* После проведения испытаний с использованием РКТ каждому образцу и шагу нагружения соответствует маркированный файл с данными распре-

деления коэффициентов рентгеновского ослабления, значением приложенной нагрузки и соответствующим перемещением верхнего торца. Маркированный файл представляет собой трехмерный массив, значения которого характеризует коэффициент рентгеновского ослабления. В первую очередь проводилась сегментация данных на твердую и жидкую фазы материала, медную сетку. Для последующей оценки перемещений образца в первую очередь обработке подвергались данные медной сетки, а именно, определялись углы и узлы сетки [31, 32]. Для этого использован детектор-метод Харриса [33] в модификации для трехмерного случая [34, 35]. Ниже приведено краткое описание метода.

Для автоматизации определения реперных точек вводилась функция интенсивности изображения  $I(x, y, z)$ , которая определяется в координате каждого вокселя образца. В качестве функции использовалась сумма значений Хаунсфилда в области. Для нахождения пересечений медной сетки вводится бинарное окно  $W$  с шагом смещения  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ . В таком случае изменение интенсивности  $E$  в окрестности точки с координатами  $(x, y, z)$  при сдвиге на  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  с весовой функцией окна  $w$  определялось как:

$$E(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \sum_{(x,y,z) \in W} w(x, y, z) (I(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z) - I(x, y, z))^2.$$

Разложение функции изменения интенсивности в ряд Маклорена приводит к выражению:

$$E(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (\Delta x, \Delta y, \Delta z) \mathbf{M} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix},$$

где  $\mathbf{M}$  — автокорреляционная матрица,

$$\mathbf{M} = \sum_{(x,y,z) \in W} w(x, y, z) \begin{pmatrix} I_x^2 & I_x I_y & I_x I_z \\ I_x I_y & I_y^2 & I_y I_z \\ I_x I_z & I_y I_z & I_z^2 \end{pmatrix}.$$

В этом случае особые точки определяются как наибольшие собственные значения автокорреляционной матрицы. Поэтому соотношение собственных значений этой матрицы представляет практический интерес. Для удобства вычисления вводилась мера отклика, зависящая от найден-

ного эмпирическим способом коэффициента  $k$ . Значение коэффициента находится в интервале 0,003–0,006 [34], а мера отклика имеет вид  $R = \det \mathbf{M} - k (\text{trace}(\mathbf{M}))^3$ .

Для полученного распределения меры отклика  $R$  по пространству томографии решалась задача локальных максимумов и таким образом определялись интересующие точки — реперные. Следовательно, описанный метод позволяет определить реперные точки для каждого шага нагружения образца [29].

*Восстановление поля перемещений образца.* Полученные координаты реперных точек использовались для восстановления поля перемещений. Первоначально необходимо получить соответствие между реперными точками на каждом шаге нагружения, для чего применялась мера бутылочного горлышка:

$$R(A_i, S_B) = \min_{\forall B_j \in S_B} \|\overline{A_i} - \overline{B_j}\|, \forall A_i \in \overline{S_A}.$$

На основе этой меры для каждой точки восстанавливалась траектория на базе парного сравнения соседних шагов нагружения. Вектор перемещений определялся как разность деформированного и недеформированного состояний. Таким образом, начиная с первого шага нагружения итерационно определялось перемещение всех реперных точек, с учетом которых находится перемещение внутри образца с использованием интерполяционного полинома

$$U_i^j = \alpha_1^j + \alpha_2^j x_i + \alpha_3^j y_i + \alpha_4^j z_i + \alpha_5^j x_i y_i + \alpha_6^j x_i z_i + \alpha_7^j y_i z_i + \alpha_8^j x_i y_i z_i,$$

где  $\alpha_k^j$  — неизвестный коэффициент интерполяции;  $i$  — номер узла;  $j$  — номер компоненты перемещения;  $k$  — номер коэффициента интерполяционного полинома.

Полученная интерполяция использовалась для переноса поля перемещений на сетку физических объемов образца, которые располагались внутри медной сетки. Полученное поле перемещений узлов сетки физических объемов позволяло расчетным образом определить деформированную геометрию каждого физического объема. Более подробно этот метод рассмотрен в [29].

*Подсчет структурных характеристик.* Для количественной оценки структурных изменений образца в каждом элементе объемной сетки определялись пористость и объемная деформация. Для этого использованы сегментированные данные твердой и жидкой фракций.

Объем поры оценивался прямым методом по формуле

$$\varphi_i^k = \sum_j w_i^k(x_j, y_j, z_j) I_B(x_j, y_j, z_j).$$

Объемная деформация определялась как изменение физического объема при нагружении:

$$\theta_i^k = \frac{dV_i^k - dV_0^k}{dV_0^k},$$

где  $i$  — индекс, соответствующий шагу нагружения;  $0$  — начальное и ненагруженное состояния образца;  $k$  — индекс, определяющий номер соответствующего физического объема.

Для определения пористости использовался объем физического объема в актуальном состоянии. При наличии нагрузки — объем деформированного состояния образца, при недеформированном состоянии нагрузка отсутствовала. Пористость определялась прямым методом по формуле:

$$\varphi_i^k = \frac{\sum_j w_i^k(x_j, y_j, z_j) \cdot I_B(x_j, y_j, z_j)}{\sum_j w_i^k(x_j, y_j, z_j)}.$$

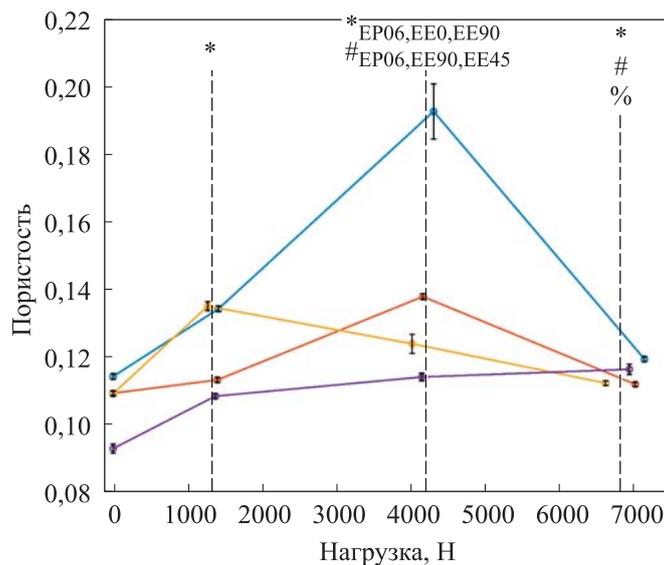
Здесь  $w^k(x, y, z)$  — весовая функция окна, определяющая соответствующий физический объем  $k$ ;  $I_B$  — функция интенсивности;  $\cdot$  — умножение по Адамару; суммирование проводилось по всем точкам окна.

**Результаты.** В рамках исследования проведены испытания, по описанному выше методу. После обработки данных, полученных с РКТ, определена исследуемая область, которая ограничена 27 физическими объемами ( $3 \times 3 \times 3$ ). Значение сжимающей нагрузки для каждого шага нагружения приведены ниже:

Шаг нагружения .....	0	1	2	3
Среднее, Н .....	0	1360,8	4143,6	6903
Стандартное отклонение, Н .....	0	64,9	117,8	221,32
Коэффициент вариации, % .....	0	4	2	3

При проектировании пористых образцов предполагалась одинаковая пористость каждого физического объема. Расчет пористости образца проводился для каждого физического объема, после чего усреднялся. Таким образом, итоговая пористость образцов после изготовления составила: для ЕР06  $11,3 \pm 0,4$  %, для ЕЕ0  $10,8 \pm 0,3$  %, для ЕЕ45  $10,9 \pm 0,4$  %, для ЕЕ90  $9,5 \pm 0,7$  %.

Аналогично рассчитывалось значение пористости на каждом шаге нагружения (рис. 3). На рисунке отображена стандартная погрешность распределения пористости в физических объемах. В рамках эксперимента все шаги нагружения сравнивались между собой по двухвыборочному критерию Колмогорова — Смирнова.



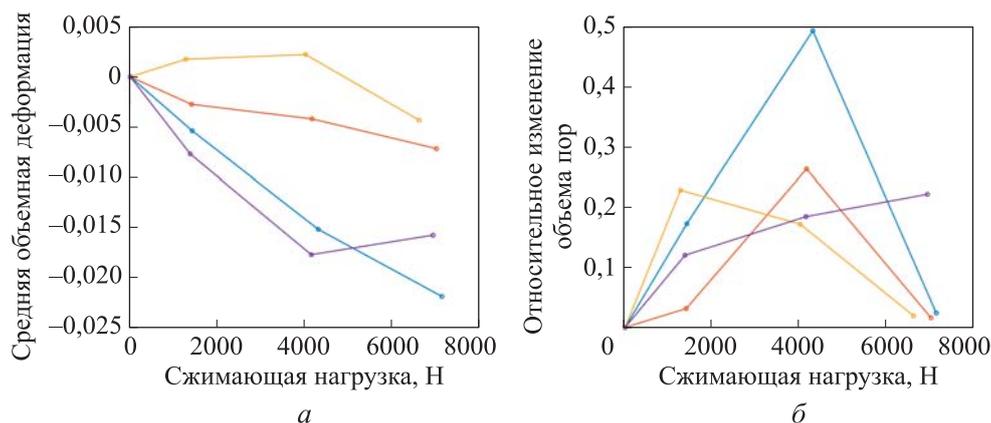
**Рис. 3.** Зависимость пористости от нагрузки для образцов EP06 (—), EE0 (—), EE45 (—) и EE90 (—)

Символами \*, #, % на рис. 3 обозначены данные, обладающие статистически значимыми различиями: \* отображает наличие статистически значимого различия по сравнению с недеформированным состоянием, # — первый шаг нагружения, % — второй шаг нагружения. Нижними индексами обозначены шифры образцов, для которых не наблюдались различия, если шифры не указаны, то статистически значимые различия наблюдались для всех образцов.

Результаты экспериментов подтвердили увеличение пористости на первом шаге нагружения. На втором шаге нагружения увеличение пористости зафиксировано у всех образцов кроме EE45. На третьем шаге нагружения все образцы, кроме EE90 (это можно связать с недостаточной критической нагрузкой для достижения такого эффекта), возвращались к первоначальной пористости.

Объемная деформация на первых двух шагах нагружения вела себя монотонно: наблюдалось уменьшение объемной деформации для всех образцов, кроме EE45. Увеличение объемной деформации для образца EE45

может быть обусловлено направлением эллиптичности поры в пространстве относительно линии действия нагрузки. На третьем шаге нагружения монотонность объемной деформации нарушалась у образцов ЕЕ45 и ЕЕ90. Зависимость средней объемной деформации физических объемов от сжимающей нагрузки приведена на рис. 4, а.



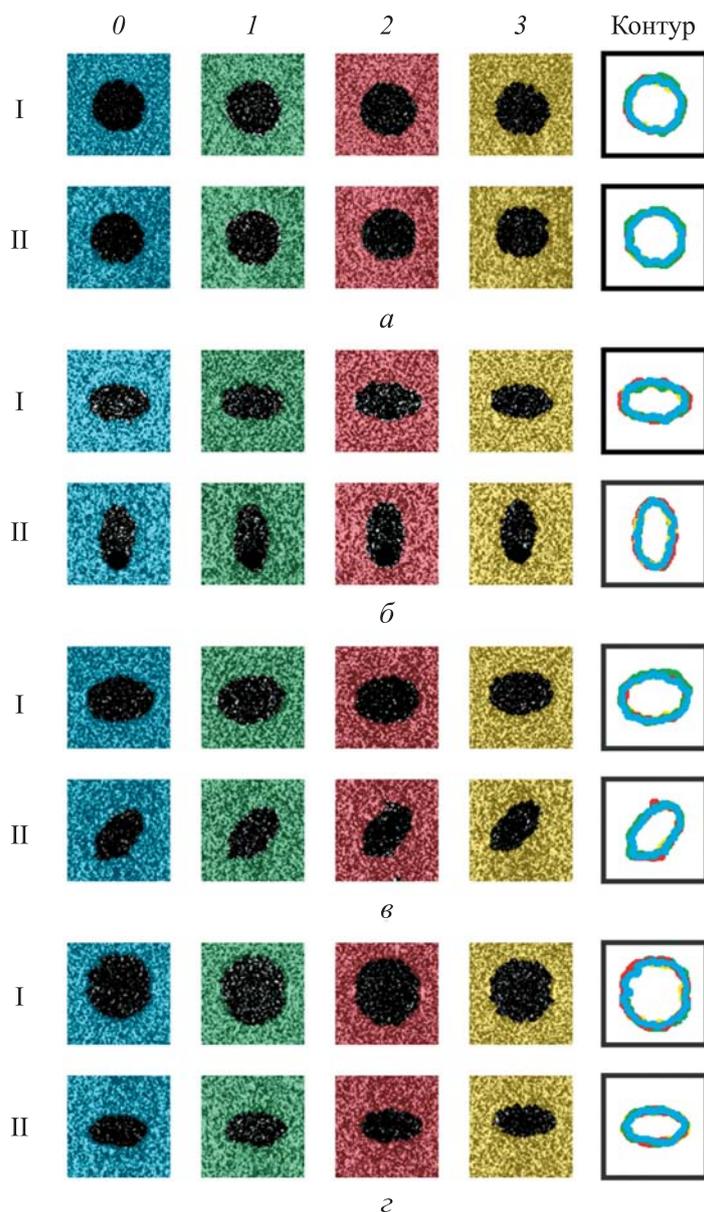
**Рис. 4.** Зависимости средней объемной деформации физических объемов (а) и относительного изменения объема пор (б) от сжимающей нагрузки для образцов EP06 (—), EE0 (—), EE45 (—) и EE90 (—)

Исследование относительного изменения объема пор показало, что на первом шаге нагружения объем пор увеличился для всех образцов (рис. 4, б). На втором шаге нагружения объем пор также возрастал для всех образцов, кроме ЕЕ45. На третьем шаге нагружения объем пор уменьшался для всех образцов, кроме ЕЕ90. Так, в экспериментах объем пор максимально возрастал в среднем на 25 %, а для образца EP06 — на 50 %.

Для наглядности на рис. 5 показаны срезы в продольном и поперечном сечениях характерного физического объема при различных значениях сжимающей нагрузки. Для удобства восприятия на твердую фазу в сечениях наложены цветные маски. Голубым цветом выделены сечения в ненагруженном состоянии, зеленым — на первом шаге нагружения, красным — на втором, желтым — на третьем. Отдельно приведены контуры поры на различных шагах нагружения. Цветовая дифференциация контуров соответствует шагам нагружения.

**Обсуждение полученных результатов.** При исследовании образцов с одинаковой пористостью, но с различными геометрическими параметрами сфероидальной поры под действием внешней сжимающей нагрузки наблюдалось увеличение пористости на первом шаге нагружения. На ос-

нове данных об увеличении пористости при нагружении была выдвинута гипотеза, что изменение пористости происходило вследствие обжатия материала вокруг поры с несжимаемой жидкостью. Однако эту гипотезу опровергают результаты измерения объема поры при нагружении — объем пор также возрастал.



**Рис. 5.** Изменение геометрии поры в поперечном (I) и продольном (II) сечениях на нулевом (0), первом (1), втором (2) и третьем (3) шагах нагружения для образцов EP06 (а), EE0 (б), EE45 (в) и EE90 (z)

Обращаясь к другим результатам, можно выделить несколько работ. Так, анализ эволюции пор мягкой глины в процессе всестороннего нагружения и разгрузки обсуждался в [22]. Приведены зависимости процента крупных пор (диаметр поры  $\approx 0,6$  мкм) от внешней нагрузки. В процессе нагружения процент площади крупных пор уменьшался до некоторой определенной нагрузки, а после превышения ее соответствующий процент увеличивался. Авторы работы [22] связывают этот эффект с образованиями новых каналов при разрушении скелета глины, что в свою очередь создает крупномасштабные поры. В настоящем исследовании картина зависимости нагружения и пористости образца противоположная, но можно предположить, что это связано со спецификой грунтовых материалов. Материал исследуемых образцов (фотополимерная смола) не так податлив внутренней эволюции структуры при нагружении в отличие от глины. Однако проведенные эксперименты также показывают наличие критической нагрузки, после которой характер изменения пористости меняется. Это связано с разрушением внешней границы поры (появлением трещин), что приводит к уменьшению пористости.

Близкие результаты показаны и при исследовании эволюции более твердых структур — угольные структуры, содержащие воду. Так, в [21] показано увеличение пористости закрытых пор при циклическом гидростатическом нагружении. Образец представлял собой структуру с закрытыми и открытыми порами. В работе отдельно оценивалась эффективная и общая пористость и показано, что при увеличении амплитуды циклической нагрузки пористость закрытых пор возрастала при уменьшении общей пористости образца. Увеличение пористости закрытых пор объясняется как закрытием открытых пор, так и появлением абсорбционных (поры, возникающие за счет поглощения материалом жидкости) при нагружении.

Следует отметить, что у неоднородных объектов в зависимости от геометрии пор наблюдается изменение физико-механических свойств [20, 36]. Так, в [20] исследуемый образец становится жестче с увеличением пористости, а в [36] наблюдается связь между уменьшением пористости и соответствующим уменьшением модуля Юнга. Однако общее понимание этого взаимодействия на данный момент не сформировано, поэтому вопрос исследования структур с порами требует дальнейшего изучения.

**Заключение.** Исследовано изменение геометрии закрытых пор с флюидом под действием сжимающей нагрузки с использованием рентгеновского компьютерного томографа. В качестве объекта исследования выступали образцы с одинаковой пористостью, но с разной геометрией пор. Исследованы сферическая и эллипсоидальная геометрии пор. Для эллип-

соидальных пор рассмотрена различная ориентация относительно линии действия нагрузки. Флюид в закрытых порах появлялся вследствие влияния метода производства, а именно закупоривания фотополимерной смолы во время лазерной стереолитографии. Эксперименты показали нелинейную связь между внешней нагрузкой и пористостью. Так, на первых шагах нагружения пористость росла, а на последнем — снижалась. Максимальное увеличение пористости для эллипсоидальной поры составило 25 %, для сфероидальной — 50 %. Это свидетельствует о влиянии геометрии поры на пористость под действием нагрузки. Вопрос о влиянии масштаба пор и характера флюида требует отдельного изучения и является целью продолжения исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Маслов Л.Б., Дмитриук А.Ю., Жмайло М.А. и др. Исследование прочности эндопротеза тазобедренного сустава из полимерного материала. *Российский журнал биомеханики*, 2022, № 4, с. 19–33. EDN: MFBXQC
- [2] Маслов Л.Б., Дмитриук 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. EDN: TEWUZZ
- [3] Saviour C.M., Gupta S. Design of a functionally graded porous uncemented acetabular component: influence of polar gradation. *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Eng.*, 2023, vol. 39, iss. 6, art. 3709. DOI: <https://doi.org/10.1002/cnm.3709>
- [4] Bolshakov P., Raginov I., Egorov V., et al. Design and optimization lattice endoprosthesis for long bones: manufacturing and clinical experiment. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 5, art. 1185. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13051185>
- [5] Суфияров В.Ш., Орлов А.В., Попович А.А. и др. Расчетное исследование прочности эндопротеза из материала с градиентной ячеистой структурой. *Российский журнал биомеханики*, 2021, № 1, с. 64–77. EDN: KZRRAT
- [6] Li Q., Wu L., Hu L., et al. Axial compression performance of a bamboo-inspired porous lattice structure. *Thin-Wall. Struct.*, 2022, vol. 180, art. 109803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109803>
- [7] Xu C., Li M., Huang J., et al. Efficient biscale design of semiregular porous structures with desired deformation behavior. *Comput. Struct.*, 2017, vol. 182, pp. 284–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.12.006>
- [8] Bolshakov P., Kharin N., Kashapov R., et al. Structural design method for constructions: simulation, manufacturing and experiment. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 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. 188, 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, iss. 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.*, 2018, vol. 4, iss. 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] 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, iss. 2, pp. 229–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.09.013>
- [16] 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>
- [17] 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>
- [18] Zhu L., Li M., Xu W. Direct design to stress mapping for cellular structures. *Vis. Inform.*, 2019, vol. 3, iss. 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, iss. 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, iss. 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. Test.*, 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. EDN: QXRPVW
- [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 РФ 2755098. Заявл. 12.02.2021, опубл. 13.09.2021.
- [31] Razinkov E., Saveleva I. On the implementation of ALFA — agglomerative late fusion algorithm for object detection. In: Kerautret B., Colom M., Lopresti D., Monasse P., Talbot H. (eds). *Reproducible Research in Pattern Recognition. RRPR 2018. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11455. Cham, Springer, 2019, pp. 98–103. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23987-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23987-9_9)
- [32] Razinkov E., Saveleva I., Matas J. ALFA: agglomerative late fusion algorithm for object detection. *ICPR*, 2018, pp. 2594–2599. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPR.2018.8545182>
- [33] Alison Noble J. Finding corners. *Image Vis. Comput.*, 1988, vol. 6, iss. 2, pp. 121–128. DOI: [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(88\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0262-8856(88)90007-8)
- [34] Hafiz D.A., Bayummy A.B.Y., Sheta W.M., et al. Interest point detection in 3D point cloud data using 3D Sobel — Harris operator. *Intern. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.*, 2015, vol. 29, no. 7, art. 1555014. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218001415550149>
- [35] Sipiran I., Bustos B. Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes. *Vis. Comput.*, 2011, vol. 27, no. 11, pp. 963–976. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-011-0610-y>

[36] Kanwar S., Al-Ketan O., Vijayavenkataraman S. A novel method to design biometric, 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>

**Харин Никита Вячеславович** — младший научный сотрудник лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева КФУ (Российская Федерация, 420008, Казань, Кремлевская ул., д. 18).

**Акифьев Кирилл Николаевич** — лаборант-исследователь лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева КФУ (Российская Федерация, 420008, Казань, Кремлевская ул., д. 18).

**Стаценко Евгений Олегович** — младший научный сотрудник лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева КФУ (Российская Федерация, 420008, Казань, Кремлевская ул., д. 18).

**Семенова Елена Вячеславовна** — научный сотрудник лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева КФУ (Российская Федерация, 420008, Казань, Кремлевская ул., д. 18).

**Саченков Оскар Александрович** — канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерной математики и информатики Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского КФУ (Российская Федерация, 420008, Казань, Кремлевская ул., д. 18).

**Большаков Павел Владиславович** — младший научный сотрудник лаборатории механики оболочек НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева КФУ (Российская Федерация, 420008, Казань, Кремлевская ул., д. 18).

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

Харин Н.В., Акифьев К.Н., Стаценко Е.О. и др. Исследование пористости образца с флюид насыщенными закрытыми порами под действием внешней нагрузки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 3 (114), с. 70–91. EDN: SAQEVV

**RESEARCH OF POROSITY IN A SAMPLE  
WITH THE FLUID-SATURATED CLOSED PORES EXPOSED  
TO EXTERNAL LOAD**

**N.V. Kharin**

**K.N. Akifyev**

**E.O. Statsenko**

**E.V. Semenova**

**O.A. Sachenkov**

**P.V. Bolshakov**

[nik1314@mail.ru](mailto:nik1314@mail.ru)

[kirill.akifyev@mail.ru](mailto:kirill.akifyev@mail.ru)

[e.statsenko@yahoo.com](mailto:e.statsenko@yahoo.com)

[elena.semionova2011@rambler.ru](mailto:elena.semionova2011@rambler.ru)

[4works@bk.ru](mailto:4works@bk.ru)

[bolshakov-pavel@inbox.ru](mailto:bolshakov-pavel@inbox.ru)

**Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation**

### Abstract

Modern production capabilities are making it possible to create structures with irregular and heterogeneous structures. Specifics appear in such structures operation associated with alterations in their internal structure exposed to deformation. Such alterations include local destruction and changes in the main skeleton structure; and these effects negatively influence the physical and mechanical properties. Study objects were samples with the fluid-saturated pores. Fluid appeared in the closed pores due to the photopolymer resin clogging during laser stereolithography. Samples were scanned using the X-ray computer tomograph without external loading and with different compressive longitudinal forces. Four samples with the same porosity were considered, but the pore geometries were different. The paper shows that porosity, volumetric deformation and relative porosity are acting nonlinearly depending on the external compressive force. An increase in porosity in loading was observed in all the samples. Thus, maximum increase in porosity for the ellipsoidal pore was 25 %, and for the spheroidal pore — 50 %. The results indicate the pore geometry influence on the porosity exposed to a compressive load

### Keywords

*Computer tomography, stress-strain state, porosity, experiment, closed pores, fluid-saturated pores*

Received 22.08.2023

Accepted 10.01.2024

© Author(s), 2024

---

*The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-21-00274)*

### REFERENCES

- [1] 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*, 2022, no. 4, pp. 19–33 (in Russ.). EDN: MFBXQC
- [2] 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. *Russ. J. Biomech.*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 357–374. DOI: <https://doi.org/10.15593/RJBiomech/2021.4.07>
- [3] Saviour C.M., Gupta S. Design of a functionally graded porous uncemented acetabular component: influence of polar gradation. *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Eng.*, 2023, vol. 39, iss. 6, art. 3709. DOI: <https://doi.org/10.1002/cnm.3709>
- [4] Bolshakov P., Raginov I., Egorov V., et al. Design and optimization lattice endoprosthesis for long bones: manufacturing and clinical experiment. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 5, art. 1185. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13051185>

- [5] Sufiyarov V.Sh., Orlov A.V., Popovich A.A., et al. Designing a graded-material endoprosthesis and its structural characteristics modelling. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*, 2021, no. 1, pp. 64–77 (in Russ.). EDN: KZRRAT
- [6] Li Q., Wu L., Hu L., et al. Axial compression performance of a bamboo-inspired porous lattice structure. *Thin-Wall. Struct.*, 2022, vol. 180, art. 109803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109803>
- [7] Xu C., Li M., Huang J., et al. Efficient biscale design of semiregular porous structures with desired deformation behavior. *Comput. Struct.*, 2017, vol. 182, pp. 284–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.12.006>
- [8] Bolshakov P., Kharin N., Kashapov R., et al. Structural design method for constructions: simulation, manufacturing and experiment. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 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. 188, 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, iss. 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.*, 2018, vol. 4, iss. 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] 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, iss. 2, pp. 229–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.09.013>
- [16] 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>
- [17] 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>

- [18] Zhu L., Li M., Xu W. Direct design to stress mapping for cellular structures. *Vis. Inform.*, 2019, vol. 3, iss. 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, iss. 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, iss. 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. Test.*, 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.). EDN: QXRPVW

- [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] Razinkov E., Saveleva I. On the implementation of ALFA — agglomerative late fusion algorithm for object detection. In: Kerautret B., Colom M., Lopresti D., Monasse P., Talbot H. (eds). *Reproducible Research in Pattern Recognition. RRPR 2018. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11455. Cham, Springer, 2019, pp. 98–103. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23987-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23987-9_9)
- [32] Razinkov E., Saveleva I., Matas J. ALFA: agglomerative late fusion algorithm for object detection. *ICPR*, 2018, pp. 2594–2599. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPR.2018.8545182>
- [33] Alison Noble J. Finding corners. *Image Vis. Comput.*, 1988, vol. 6, iss. 2, pp. 121–128. DOI: [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(88\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0262-8856(88)90007-8)
- [34] Hafiz D.A., Bayumy A.B.Y., Sheta W.M., et al. Interest point detection in 3D point cloud data using 3D Sobel — Harris operator. *Intern. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.*, 2015, vol. 29, no. 7, art. 1555014. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218001415550149>
- [35] Sipiran I., Bustos B. Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes. *Vis. Comput.*, 2011, vol. 27, no. 11, pp. 963–976. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-011-0610-y>
- [36] 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>

**Kharin N.V.** — Junior Researcher, N.G. Chebotarev SRC SRI of Mathematics and Mechanics, Laboratory of Shell Mechanics, Kazan Federal University (Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russian Federation).

**Akifyev K.N.** — Research Assistant, N.G. Chebotarev SRC SRI of Mathematics and Mechanics, Laboratory of Shell Mechanics, Kazan Federal University (Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russian Federation).

**Statsenko E.O.** — Junior Researcher, N.G. Chebotarev SRC SRI of Mathematics and Mechanics, Laboratory of Shell Mechanics, Kazan Federal University (Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russian Federation).

**Semenova E.V.** — Junior Researcher, N.G. Chebotarev SRC SRI of Mathematics and Mechanics, Laboratory of Shell Mechanics, Kazan Federal University (Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russian Federation).

**Sachenkov O.A.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of the Department of Computer Mathematics and Informatics, N.I. Lobachevsky Institute of Mathematics and Mechanics, Kazan Federal University (Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russian Federation).

**Bolshakov P.V.** — Junior Researcher, N.G. Chebotarev SRC SRI of Mathematics and Mechanics, Laboratory of Shell Mechanics, Kazan Federal University (Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russian Federation).

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

KhariN N.V., Akifyev K.N., Statsenko E.O., et al. Research of porosity in a sample with the fluid-saturated closed pores exposed to external load. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 3 (114), pp. 70–91 (in Russ.). EDN: SAQEVR