

ПОЛИМЕРНЫЕ, БИООРГАНИЧЕСКИЕ И ГИБРИДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ

УДК 541.68+661.728.82

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ ХИТОЗАНА: НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2024 г. О. В. Никуленкова^{1,*}, А. Е. Крупнин¹, П. В. Дмитрияков¹, Ю. Д. Загоскин¹,
С. Н. Малахов¹, Т. Е. Григорьев^{1,2}, Н. М. Кузнецов¹, С. Н. Чвалун^{1,3}

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

³Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва, Россия

*e-mail: nikulenkovaov@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.05.2024 г.

После доработки 07.05.2024 г.

Принята к публикации 14.05.2024 г.

Исследовано механическое поведение пористых частиц различных диаметров, полученных крио-лиофилизационным высушиванием замороженных капель 1 мас. % раствора хитозана в водном растворе уксусной кислоты (1 мас. %). Морфология частиц визуализирована методом растровой электронной микроскопии. Показано, что частицы обладают преимущественно сферической формой и сотоподобной структурой со взаимопроникающими порами. По результатам механических испытаний индивидуальных частиц на сжатие между параллельными пластинами и численного решения задачи обратного проектирования с применением метода конечных элементов определены механические характеристики материала частиц по моделям нео-Гука, Йо 2-го порядка, Блатца–Ко, а также пены Огдена 3-го порядка. Для предложенных моделей построены диаграммы деформирования. Проведена верификация полученных моделей в аналогичном эксперименте на сжатие частиц другого диаметра.

DOI: 10.56304/S1992722324601861

ВВЕДЕНИЕ

XXI столетие по праву считается веком полимеров. Наука, изучающая полимеры, зародилась совсем недавно, в 1920-х гг., когда Герман Штаудингер изменил представления о ряде материалов, в том числе натуральном каучуке, ввел понятие полимеризации и создал макромолекулярную теорию [1]. Несмотря на относительно короткий срок исследований, область высокомолекулярных соединений получила значительное развитие и, без преувеличения, изменила мир [2]. Сегодня полимерные материалы используют повсеместно — от упаковки, текстиля, конструкционных, армирующих материалов, фильтров и мембран до матриксов в тканевой инженерии, средств доставки лекарственных препаратов, стимул-чувствительных материалов, защитных покрытий, сенсоров и датчиков [3–9]. Столь широкий набор практических применений обусловлен прежде всего особенностями химического состава и строения полимерных молекул, высокой молекулярной массой и гибкостью цепи.

Полимерные композиционные материалы обычно представляют собой комбинацию высокомолекулярной матрицы и наполнителя, что позволяет получать изделия с новыми или улучшенными синергетическими свойствами [10]. Природа наполнителя может быть различной — как неорганической, так и полимерной. В последние годы в области регенеративной и персонализированной медицины наблюдается существенный интерес к биосовместимым и биоразлагаемым полимерным материалам, выполняющим каркасную функцию или роль носителя лекарственного препарата [4, 11–13].

Пористые полимерные микрочастицы — микроаэрогели представляют отдельный интерес в качестве наполнителя для композиционных материалов. Высокая пористость и сильно разветвленная структура, с одной стороны, обуславливают механическую прочность получаемых композиций, что важно для направленного управления свойствами гидрогелевых систем [14, 15], а с другой стороны, открывают возможности для внедрения различных активных агентов: белков, по-

липлексов, аденовирусов [16, 17]. Кроме того, высокопористые микрочастицы показали свою эффективность при создании электрореологических жидкостей — стимул-чувствительных материалов, обратимо изменяющих свое поведение с вязкого на упругое в электрическом поле [18, 19]. Ранее был предложен простой способ получения таких частиц, который заключается в пневматическом распылении раствора соответствующего полимера в подходящем растворителе, быстрой кристаллизации капель в жидком азоте и последующем удалении растворителя методом сублимации. Таким образом были получены частицы на основе полилактида [20] и хитозана [21], а также композиционные микроаэрогели последнего с наночастицами серебра [19] и наноцеллюлозы с полиэтиленгликолем [22].

Поскольку наполнитель определяет свойства композиционного материала и конечного изделия, понимание и прогнозирование механического поведения индивидуальных пористых частиц становится актуальной научной задачей. В настоящее время для определения механических характеристик индивидуальных частиц различной природы используют как аналитические, так и численные методы. Широкое распространение получила методика испытаний индивидуальных частиц на сжатие между параллельными пластинами. Тем не менее полученные по результатам данного вида испытаний кривые зависимости силы от перемещения не могут быть напрямую использованы для определения механических характеристик частиц и распространены на другие, более сложные задачи контактного взаимодействия. Построение диаграммы деформирования материала частиц по результатам одного вида испытаний является нетривиальной задачей и требует введения определенных предположений, проведения дополнительных исследований, включающих в себя анализ внутренней структуры рассматриваемого объекта. Несмотря на отдельные работы, посвященные аналитическому описанию контакта между сферическим телом и жесткой плоскостью с учетом только геометрических параметров [23], полученное Герцем аналитическое решение контактной задачи для двух твердых упругих тел является классическим и позволяет связать между собой силу F и перемещение δ через параметры упругости материалов. В частности, когда одно из тел представляет собой жесткую плоскую плиту, а другое — шар, эта зависимость имеет следующий вид [24, 25]:

$$F = \frac{E\sqrt{2R}}{3(1-\nu^2)}\delta^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где R, E, ν — радиус, модуль упругости и коэффициент Пуассона частицы.

Расширение соотношения на случай упруго-пластических деформаций сферических частиц при различных условиях контакта представлено в [26]. Влияние механических свойств материала на начало разрушения исследовано путем определения критических значений перемещения и нормальной силы, при которых возникают первые пластические деформации или происходит хрупкое разрушение. Решение задачи построено как на использовании аналитического решения задачи Герца для контакта без трения, так и на численной процедуре с применением метода конечных элементов (МКЭ) при наличии прилипания. При достижении предела текучести материала использован критерий Мизеса, при хрупком разрушении — критерий наибольших нормальных напряжений. Расширение решения задачи Герца на случай контакта вязкоупругих гидрогелевых несжимаемых частиц приведено в [24]. Показано, что учет релаксационных свойств материала за счет введения экспоненциального оператора релаксации и кулоновского трения позволяет прогнозировать не только механический отклик при сжатии между параллельными пластинами, но и силы, возникающие при контакте сферических частиц между собой. Существует альтернативный подход учета вязкоупругих свойств, основанный на применении структурной реологической модели Кельвина—Фойгта [27]. Метод дискретных элементов использован для описания деформирования частиц, состоящих из жесткой внешней оболочки и мягкого вязкоупругого ядра. В [28] численно решена задача удара вязкоупругой сферы о жесткую плоскую плиту. На основе теоретического анализа и результатов МКЭ был разработан новый набор полуаналитических моделей для определения нормальной и тангенциальной составляющих контактной силы, показана высокая эффективность алгоритма при моделировании контактного взаимодействия. Преимущество предложенных моделей заключается в том, что все их параметры могут быть определены непосредственно из свойств материала вязкоупругих сфер. Влияние поверхностной энергии при сжатии наночастиц серебра между параллельными пластинами численно с применением МКЭ исследовано в [29]. Построены зависимости площади контакта и глубины вдавливания от сжимающей нагрузки в явном виде. По сравнению с классическими результатами теории Герца учет поверхностной энергии приводит к уменьшению размера пятна контакта, глубины вдавливания и увеличению жесткости, а также влияет на механический отклик частицы при условии, что радиус контакта сопоставим с отношением плотности поверхностной энергии к модулю упругости материала частицы. Предложен комбинированный подход, учитывающий гипер- и вязкоупругое поведение тонкостенной сферической оболочки

при контакте с абсолютно жесткой плитой [30]. С применением для анализа модели нео-Гука и Гента было подробно исследовано напряженно-деформированное состояние мембраны при ударе о недеформируемую поверхность и последующем отскоке. Разработанная конечно-элементная модель вязкоупругой мембраны на основе модели Максвелла показала хорошее соответствие с результатами натурного эксперимента.

Ранее для анализа деформирования высокопористых полимерных частиц была построена и верифицирована билинейная модель, на примере частиц диацетата целлюлозы показавшая хорошее соответствие механических характеристик между результатами расчета и натурного эксперимента на сжатие между параллельными пластинами [31]. Цель представленного исследования — создание и верификация модели для высокопористых частиц хитозана. Хитозан относится к классу природных полисахаридов и является N-деацетилированным производным хитина, второго по распространенности биополимера на планете [32]. Применение природных полисахаридов для создания современных полимерных материалов, в том числе медицинского назначения, обусловлено парадигмами зеленой химии [33] и природоподобных технологий [34] и подчеркивает актуальность представленного исследования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика получения частиц. Пористые частицы получали замораживанием в жидком азоте капель раствора хитозана концентрацией 1 мас. % (Sigma Aldrich 448877, США) в растворе уксусной кислоты, 1 мас. % (ООО “Компонент-реактив”, Россия) и последующей лиофилизационной сушкой. Капли формировали с помощью шприцов с диаметром игл 22G (0.7 мм) и 29G (0.33 мм) и бросали в емкость с жидким азотом с расстояния ~7–10 см. Далее частицы сублимировали на установке “Alpha 2–4 LDplus” (Martin Christ, Германия) в течение 72 ч при давлении 0.250 мбар с последующим досушиванием при 0.030 мбар. Были получены преимущественно сферические пористые частицы хитозана со взаимопроникающими порами и пористостью свыше 95%. В результате были сформированы две фракции частиц разных размеров в зависимости от диаметра иглы, из которых для исследований вручную отобрали частицы диаметрами в диапазонах 1.55 ± 0.13 мм (I) и 2.78 ± 0.10 мм (II) соответственно.

Растровая электронная микроскопия (РЭМ). РЭМ-изображения получали с помощью Phenom XL (ThermoFisher Scientific, США) в условиях низкого вакуума ($P = 60$ Па) при ускоряющем напряжении 5 кВ без нанесения токопроводящего покрытия. Изображения представлены в режиме

обратно рассеянных электронов. Внутреннюю структуру исследовали на срезе пористых частиц.

Механические испытания индивидуальных частиц хитозана на сжатие между параллельными пластинами проводили на испытательной машине Instron 34SC-1 (Illinois Tool Works Inc, США), оснащенной датчиком нагрузки ± 50 Н, при комнатной температуре и постоянной скорости 1 мм/мин. По результатам испытаний получили зависимость между силой и перемещением подвижной плиты. Достоверность результатов обеспечена статистически: для каждой фракции частиц I и II проведено не менее 10 экспериментов.

Конечно-элементное моделирование. На основе результатов РЭМ и механических испытаний сделано предположение о гиперупругом поведении материала частиц хитозана. Поэтому для решения задачи обратного проектирования выбрали две модели, описывающие поведение несжимаемых материалов при больших обратимых деформациях (нео-Гука и Йо 2-го порядка), а также две модели, описывающие поведение сжимаемых пен при больших обратимых деформациях (Блатца–Ко, пена Огдена 3-го порядка). Для описания деформации, происходящей без изменения объема, удобно использовать компоненты градиента вектора места F_{ij} , записанные в виде [35]:

$$\overline{F_{ij}} = J^{-1/3} F_{ij}, \quad (2)$$

где J — определитель тензора градиента деформаций.

В этом случае соотношения для кратностей деформации и инвариантов тензора меры деформации Коши–Грина могут быть записаны как

$$\overline{\lambda_p} = J^{-1/3} \lambda_p, \quad (3)$$

$$\overline{I_p} = J^{-2p/3} I_p, \quad (4)$$

где $p = 1, 2, 3$.

Упругий потенциал материала нео-Гука имеет вид [36, 37]:

$$W = \frac{\mu}{2} (\overline{I_1} - 3), \quad (5)$$

где $\overline{I_1}$ — первый инвариант модифицированного тензора меры деформации, μ — начальный модуль сдвига материала.

Упругий потенциал для модели Йо 2-го порядка имеет вид [37]:

$$W = \sum_{i=1}^2 c_{i0} (\overline{I_1} - 3)^i, \quad (6)$$

c_{i0} — подлежащие определению константы.

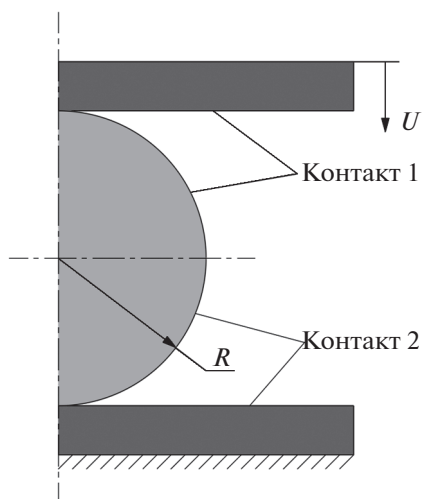


Рис. 1. Схематичное изображение граничных условий численной задачи деформирования частицы между двумя параллельными пластинами.

Для модели Блатца—Ко упругий потенциал записывается в виде [37]:

$$W = \frac{\mu}{2} \left(\frac{I_2}{I_3} + 2\sqrt{I_3} - 5 \right), \quad (7)$$

где I_2 и I_3 — второй и третий инварианты тензора меры деформаций Коши—Грина соответственно.

Упругий потенциал для модели пены Огдена 3-го имеет вид [37]:

$$W = \sum_{i=1}^3 \frac{\mu_i}{\alpha_i} \left[J^{\frac{\alpha_i}{3}} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i}) - 3 \right] + \sum_{i=1}^3 \frac{\mu_i}{\alpha_i \beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1), \quad (8)$$

где μ_i, α_i и β_i — подлежащие определению константы материала, связывающие между собой начальный модуль сдвига и коэффициент Пуассона. Данная модель была разработана Огденом в 1984 г. для описания гиперупругого поведения сжимаемых пен на основе эластомеров.

При решении осесимметричной нелинейной задачи деформирования в конечно-элементном комплексе “ANSYS Workbench” (Ansys Inc, США) материал частицы предполагали гиперупругим, а пластины абсолютно жесткими. Для численного моделирования сжатия частицы между параллельными пластинами использовали следующие граничные условия: нижняя пластина закреплена по всем степеням свободы, к верхней пластине прикладывается вертикальное перемещение (рис. 1). При построении сетки использовали восьмиузловой конечный элемент PLANE183 с размером

элемента 0.05 мм, который был определен по результатам теста на сходимость. При моделировании контакта без трения использовали расширенный метод Лагранжа. Задачу обратного проектирования решали на основе экспериментальных кривых для частиц фракции II ($D = 2.78 \pm 0.10$ мм) с помощью встроенного в ANSYS Workbench модуля многокритериальной оптимизации [31]. В качестве целевых значений использовали точки на осредненной деформационной кривой, соответствующие перемещениям 0.5, 0.8, 1, 1.5 и 1.8 мм. Верификацию проводили на осредненной деформационной кривой для частиц фракции I ($D = 1.55 \pm 0.13$ мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология частиц. Независимо от размера полученные частицы хитозана обладают преимущественно сферической формой (рис. 2а, 2б). Частицы представляют собой полимерный каркас сотоподобной структуры со взаимопроникающими порами, толщина полимерной стенки варьируется от 0.3 до 2.2 мкм (рис. 2в). Срез частиц макроскопически однороден, поры анизотропные и вытянуты в радиальном направлении (рис. 2г, 2д). Особенности морфологии обусловлены направленным ростом кристаллов растворителя при контакте аэрозоля с поверхностью жидкого азота в процессе получения частиц.

Механические испытания. По результатам натурного эксперимента построены кривые деформирования частиц обеих фракций при сжатии между параллельными пластинами (рис. 3а). Видно, что независимо от размеров частиц на диаграмме можно выделить участок, где зависимость между силой и перемещением подвижной плиты близка к линейной, а также нелинейный участок, сопровождающийся значительным повышением жесткости, — так называемый участок уплотнения (*densification*) для пористых и ячеистых материалов. Установлено, что после снятия нагрузки частицы практически полностью (до 90–95%) восстанавливают исходную геометрию, что и обусловило выбор описанных выше гиперупругих моделей поведения материала.

Параметры классической модели Герца были найдены методом наименьших квадратов на основе осредненных экспериментальных кривых для частиц фракции II: $E = 26$ кПа, $\nu = 0.32$. Модуль сдвига в этом случае равен 9.85 кПа. Верификация модели (рис. 3а) показывает удовлетворительное соответствие между теорией и натурным экспериментом при небольших перемещениях, составляющих менее 30% от диаметра частиц. Адекватно описать нелинейный участок диаграммы деформирования частиц классическое соотношение не может.

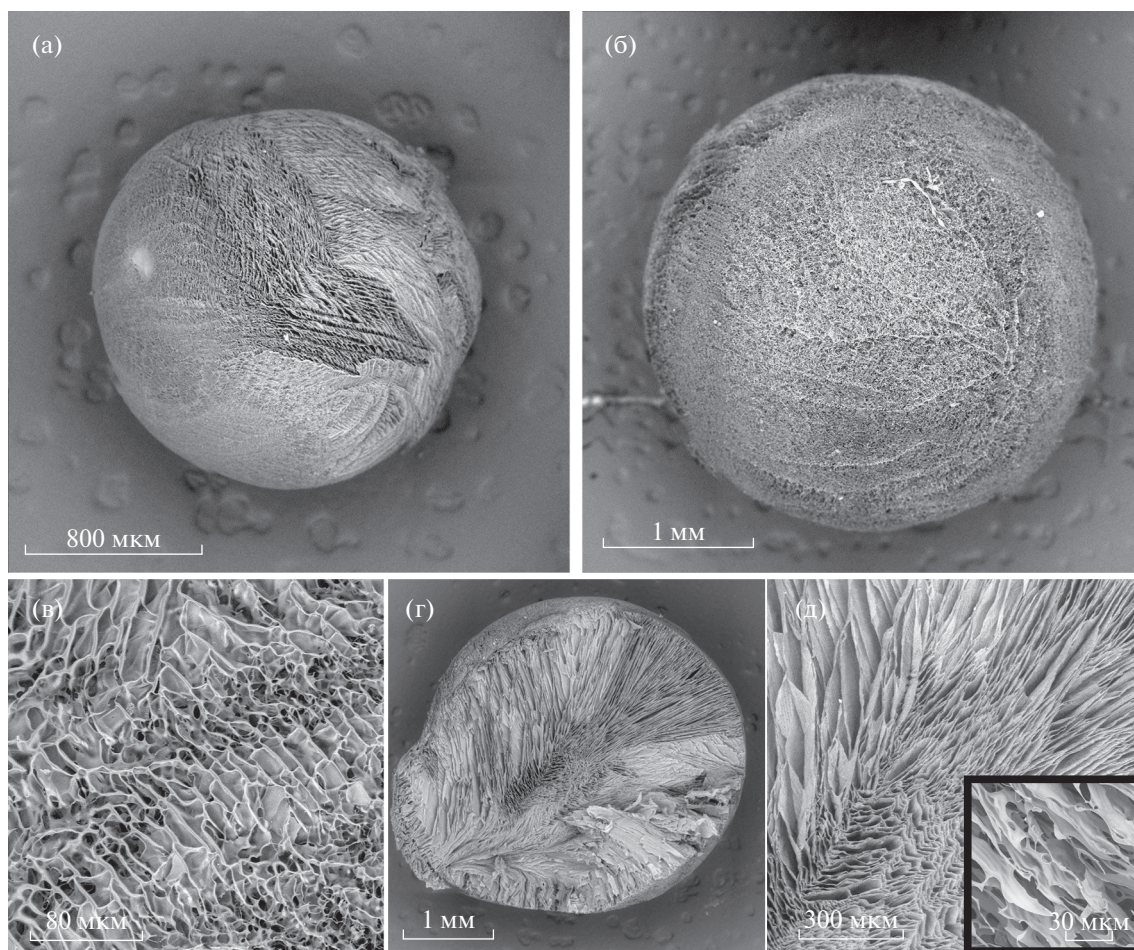


Рис. 2. Характерные РЭМ-изображения высокопористых частиц хитозана фракций I (а) и II (б), типичная морфология поверхности частиц (в), внутренняя структура частицы на срезе при различном увеличении (г, д).

Конечно-элементное моделирование. По результатам решения задачи обратного проектирования был определен начальный модуль сдвига материала частиц хитозана по модели Блатца–Ко (рис. 3б): $\mu = 10$ кПа. Видно, что модель демонстрирует заниженные значения жесткости частиц на начальном линейном участке, но адекватно описывает деформацию частиц фракции I при больших перемещениях, что, однако, нельзя распространить на частицы большего размера (фракция II). Такое расхождение между натурным и численным экспериментами можно объяснить тем, что модель Блатца–Ко хорошо применима только для мягких сжимаемых пен, коэффициент Пуассона которых близок к 0.25 [38]. Аналогичное значение начального модуля сдвига было получено для модели нео-Гука: $\mu = 10$ кПа. Однако данная модель удовлетворительно описывает поведение частиц обеих фракций в диапазоне перемещений до 1 мм. В ходе решения задачи обратного проектирования получены значения механических характери-

стик для модели Йо 2-го порядка: $c_{10} = 4$ кПа, $c_{20} = 0.001$ кПа. Видно, что данная модель отлично описывает экспериментальные кривые для частиц фракции II в диапазоне перемещения до 1.3 мм, для частиц фракции I – до 1.1 мм (рис. 3в). Таким образом, начальный модуль сдвига материала частицы равен 8 кПа. Константы модели пены Огдена 3-го порядка: $\mu_1 = 29$ кПа, $\alpha_1 = 0.515$, $\mu_2 = 5$ кПа, $\alpha_2 = 0.536$, $\mu_3 = 5$ кПа, $\alpha_3 = 0.312$, $\beta_1 = 4.0$, $\beta_2 = 3.1$, $\beta_3 = 2.79$. Начальный модуль сдвига составляет 9.59 кПа. Данная модель демонстрирует заниженные значения силы на начальном участке кривой деформирования, но на участке развитых деформаций хорошо соотносится с экспериментальными кривыми. Заметим, что построение модели пены Огдена 3-го порядка требует определения девяти констант, что является нетривиальной задачей при деформировании частиц, а учет лишь экспериментальных кривых сжатия при подборе параметров может привести

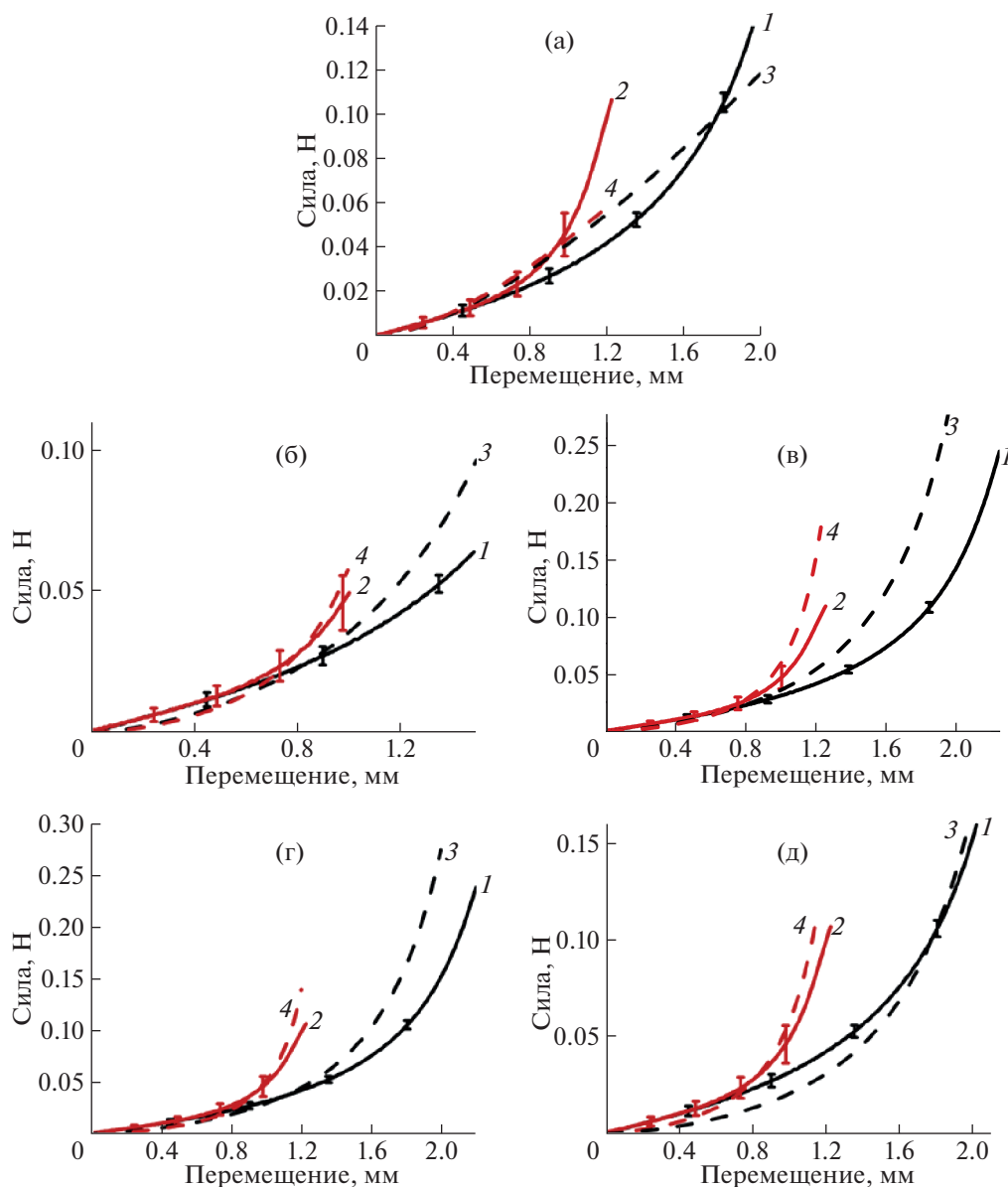


Рис. 3. Экспериментальные $D = 2.78$ (1) и $D = 1.55$ мм (2) и численные кривые деформирования частиц $D = 2.78$ (3) и $D = 1.55$ мм (4): модели Герца (а), Блатца–Ко (б), нео-Гука (в), Йо 2-го порядка (г), пены Огдена 3-го порядка (д).

к большим погрешностям при прогнозировании свойств материала, в то время как модель Йо, подбор констант которой основан только на одном наборе экспериментальных кривых, может удовлетворительно описывать поведение материала и при более сложных случаях нагружения [39]. Построенные по результатам решения задачи обратного проектирования деформационные кривые для моделей Блатца–Ко, нео-Гука, Йо 2-го порядка и пены Огдена 3-го порядка (рис. 4) могут быть использованы для решения более сложных задач, например упаковки частиц различной фракции. Видно, что для описания меха-

нического поведения частиц хитозана при малых деформациях может быть использована модель Йо 2-го порядка, при больших — модель сжимаемой пены Огдена 3-го порядка.

Для более детального изучения процесса деформирования частиц хитозана были построены поля эквивалентных по Мизесу напряжений (рис. 5а) и деформаций (рис. 5б) осредненной частицы $D = 2.78$ мм и аналогичные поля для осредненной частицы $D = 1.55$ мм (рис. 5в, 5г). Видно, что максимальные эквивалентные напряжения локализованы в ядре частицы и равны в среднем 43 кПа при деформации 163%. Можно предполо-

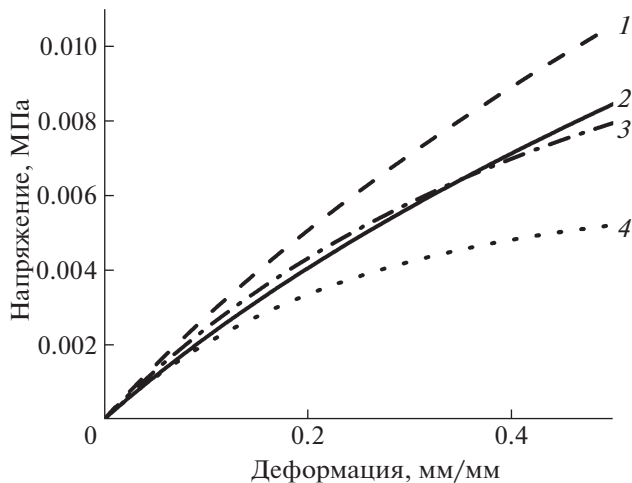


Рис. 4. Диаграммы деформирования материала частиц: модели нео-Гука (1), Йо 2-го порядка (2), пены Огдена 3-го порядка (3), Блатца–Ко (4).

жить, что наличие необратимых деформаций в частицах после разгрузки обусловлено частичным разрушением внутренней структуры при значительных перемещениях подвижной плиты и вязко-

упругой природой самих частиц. Однако данные вопросы являются предметом отдельного исследования и вынесены за рамки данной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что частицы хитозана, полученные методом криолиофилизационного высушивания, обладают преимущественно сферической формой и пористой, сотовидной структурой. Исследование срезов с помощью РЭМ позволило выявить структурные особенности пористых частиц, получаемых из хитозана: наличие пористой структуры не только на поверхности, но и в объеме, поры анизотропные и вытянуты в радиальном направлении. Механические испытания индивидуальных частиц различного диаметра на сжатие между параллельными пластинами показало хорошую воспроизводимость деформационной кривой для частиц одного размера. По результатам численного решения задачи обратного проектирования определены механические характеристики материалов частиц хитозана, основанных на моделях гиперупругости как для несжимаемых, так и сжимаемых материалов. Вер-

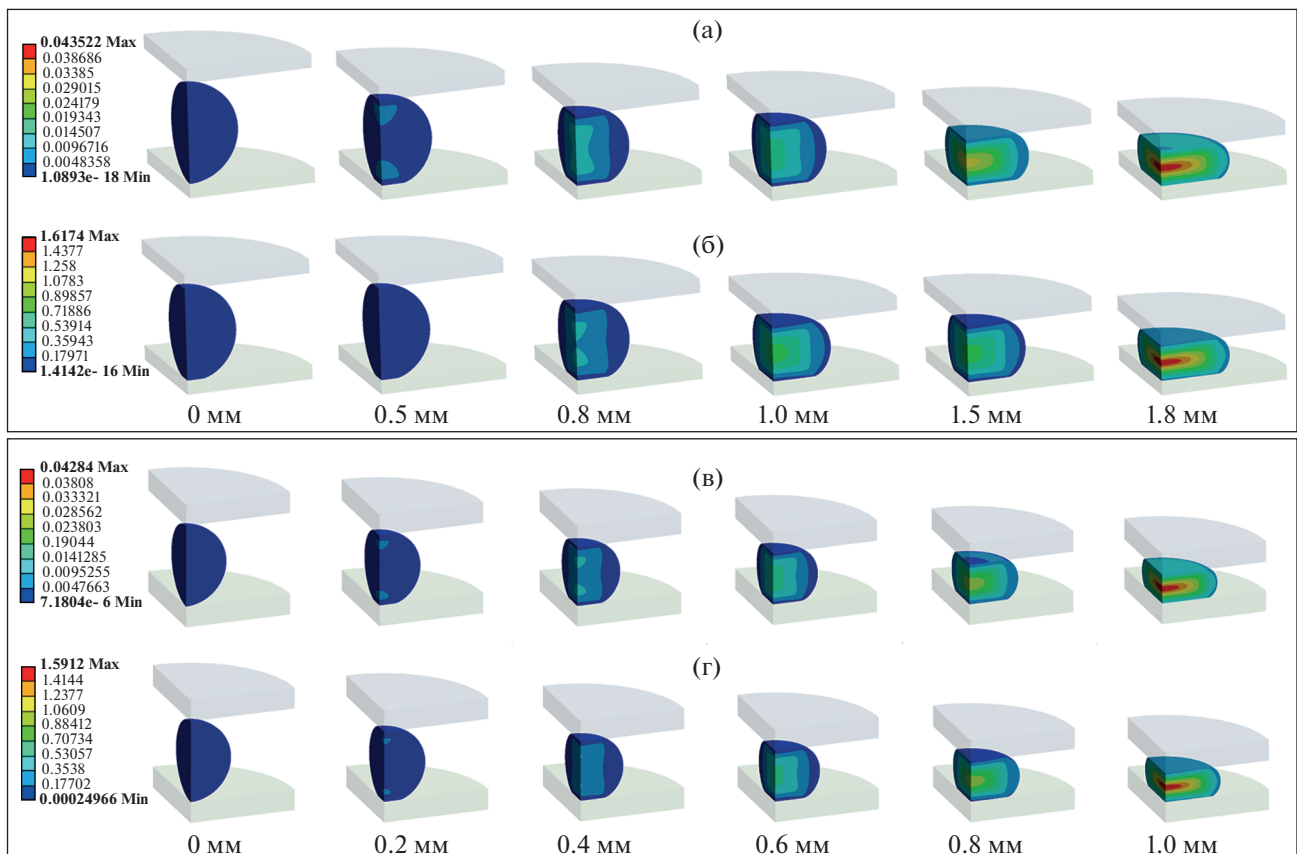


Рис. 5. Эквивалентные по Мизесу напряжения (а, в) и деформации (б, г) в процессе деформирования частиц, материал которых описывается моделью пены Огдена 3-го порядка, $D = 2.78$ и $D = 1.55$ мм соответственно.

фикация полученных моделей деформирования показала удовлетворительное соответствие между результатами численного и натурного экспериментов на сжатие для частиц хитозана меньшего размера (фракция I). Данные модели единым образом реализуют свойства материала для частиц различного диаметра, а предложенный подход к решению нелинейных задач прогнозирования механического отклика пористых частиц перспективен для моделирования механики более сложных систем.

Получение и характеристика пористых частиц выполнены в рамках работ по Госзаданию НИЦ “Курчатовский институт”. Разработка и верификация моделей конечно-элементного моделирования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-73-10081).

Авторы выражают благодарность ресурсным центрам “Оптика” и “Полимер” НИЦ “Курчатовский институт” за возможность проведения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Staudinger H.* // *Berichte Der Dtsch. Chem. Gesellschaft (A B Ser).* 1920. V. 53. № 6. P. 1073. <https://doi.org/10.1002/cber.19200530627>
2. *Arzhakova O.V., Arzhakov M.S., Badamshina E.R. et al.* // *Russ. Chem. Rev.* 2022. V. 91. № 12. RCR5062. <https://doi.org/10.57634/RCR5062>
3. *Chakraborty S., Biswas M.C.* // *Compos. Struct.* 2020. V. 248. P. 112562. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112562>
4. *Sedush N.G., Kadina Y.A., Razuvaeva E.V. et al.* // *Nanobiotechnology Reports.* 2021. V. 16. № 4. P. 421. <https://doi.org/10.1134/S2635167621040121>
5. *Kuznetsov N.M., Banin E.P., Krupnin A.E. et al.* // *Nanobiotechnology Reports.* 2023. V. 18. № 2. P. 189. <https://doi.org/10.1134/S2635167623700039>
6. *Bezudnov I.V., Khmel'nitskaia A.G., Kalinina A.A., Ponomarenko S.A.* // *Russ. Chem. Rev.* 2023. V. 92. № 2. RCR5070. <https://doi.org/10.57634/RCR5070>
7. *Alentiev A.Y., Ryzhikh V.E., Syrtsova D.A., Belov N.A.* // *Russ. Chem. Rev.* 2023. V. 92. № 6. RCR5083. <https://doi.org/10.59761/RCR5083>
8. *Huang H.-D., Ren P.-G., Zhong G.-J. et al.* // *Prog. Polym. Sci.* 2023. V. 144. P. 101722. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101722>
9. *Kochervinskii V.V., Gradov O.V., Gradova M.A.* // *Russ. Chem. Rev.* 2022. V. 91. № 11. RCR5037. <https://doi.org/10.57634/rcr5037>
10. *Nepal D., Haines J., Vaia R.A.* // *MRS Bull.* 2024. V. 49. № 3. P. 236. <https://doi.org/10.1557/s43577-023-00639-9>
11. *Demina V.A., Sedush N.G., Goncharov E.N. et al.* // *Nanobiotechnology Reports.* 2021. V. 16. № 1. P. 2. <https://doi.org/10.1134/s2635167621010043>
12. *Tenchurin T.K., Rodina A.V., Saprykin V.P. et al.* // *Polymers.* 2022. V. 14. № 20. P. 4352. <https://doi.org/10.3390/polym14204352>
13. *Kuznetsova E.V., Sedush N.G., Puchkova Y.A. et al.* // *Polymers.* 2023. V. 15. № 10. P. 2296. <https://doi.org/10.3390/polym15102296>
14. *Vasilyev A.V., Kuznetsova V.S., Bukharova T.B. et al.* // *Polymers.* 2021. V. 13. № 22. P. 3974. <https://doi.org/10.3390/polym13223974>
15. *Zagoskin Y.D., Sergeeva Y.E., Fomina Y.S. et al.* // *Biomimetics.* 2023. V. 8. № 8. P. 565. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8080565>
16. *Nedorubova I.A., Bukharova T.B., Mokrousova V.O. et al.* // *Int. J. Mol. Sci.* 2022. V. 23. № 23. P. 14720. <https://doi.org/10.3390/ijms232314720>
17. *Bukharova T.B., Nedorubova I.A., Mokrousova V.O. et al.* // *Cells.* 2023. V. 12. № 13. P. 1762. <https://doi.org/10.3390/cells12131762>
18. *Kuznetsov N.M., Kovaleva V.V., Zagoskin Y.D. et al.* // *Nanobiotechnology Reports.* 2021. V. 16. № 6. P. 840. <https://doi.org/10.1134/S2635167621060148>
19. *Kuznetsov N.M., Kovaleva V.V., Volkov D.A. et al.* // *Polym. Adv. Technol.* 2022. V. 33. P. 3643. <https://doi.org/10.1002/pat.5817>
20. *Vasilyev A.V., Bukharova T.B., Kuznetsova V.S. et al.* // *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2019. V. 10. № 4. P. 13. <https://doi.org/10.1134/S2075113319050332>
21. *Kuznetsov N.M., Zagoskin Y.D., Vdovichenko A.Y. et al.* // *Carbohydr. Polym.* 2021. V. 256. P. 117530. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117530>
22. *Kovaleva V.V., Kuznetsov N.M., Zagoskin Y.D. et al.* // *Cellulose.* 2024. V. 31. P. 4099. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05862-4>
23. *Lin Y.-L., Wang D.-M., Lu W.-M. et al.* // *Chem. Eng. Sci.* 2008. V. 63. № 1. P. 195. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.09.028>
24. *Shakya C., van der Gucht J., Dijksman J.A.* // *Front. Phys.* 2024. V. 12. <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1334325>
25. *Cheneler D., Mehrban N., Bowen J.* // *Rheol. Acta* 2013. V. 52. № 7. P. 695. <https://doi.org/10.1007/s00397-013-0707-5>
26. *Brizmer V., Kligerman Y., Etsion I.* // *Int. J. Solids Struct.* 2006. V. 43. № 18–19. P. 5736. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.07.034>
27. *Sahputra I.H., Alexiadis A., Adams M.J.* // *ChemEngineering.* 2020. V. 4. № 2. P. 30. <https://doi.org/10.3390/chemengineering4020030>
28. *Zheng Q.J., Zhu H.P., Yu A.B.* // *Powder Technol.* 2012. V. 226. P. 130. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.04.032>
29. *Ding Y., Niu X.-R., Wang G.-F.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2015. V. 48. № 48. P. 485303. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485303>

30. *Li J., Xie Y.-X.* // Int. J. Mech. Sci. 2024. V. 265. P. 108882.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108882>
31. *Nikulenкова O.V., Krupnin A.E., Zagoskin Y.D. et al.* // Nanobiotechnology Reports. 2023. V. 18. Suppl. 1. P. S110.
<https://doi.org/10.1134/S2635167623600785>
32. *Bogdanova O.I., Istomina A.P., Chvalun S.N.* // Nanobiotechnology Reports. 2021. V. 16. № 1. P. 42.
<https://doi.org/10.1134/s2635167621010031>
33. *Anastas P., Eghbali N.* // Chem. Soc. Rev. 2010. V. 39. № 1. P. 301.
<https://doi.org/10.1039/b918763b>
34. *Koval'chuk M.V., Naraikin O.S., Yatsishina E.B.* // Her. Russ. Acad. Sci. 2019. V. 89. № 2. P. 157.
<https://doi.org/10.1134/S1019331619020102>
35. *Белкин А.Е., Дашиев И.З., Хоминич Д.С.* // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. Т. 6. № 6. С. 35.
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-6-257>
36. *Plotnikov P.I.* // Dokl. Math. 2021. V. 104. № 3. P. 380.
<https://doi.org/10.1134/S1064562421060144>
37. ANSYS mechanical APDL theory reference / Ed. Kohnke P. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., 2013.
38. *Hadoush A.* // Jordan J. Mech. Ind. Eng. 2020. V. 14. № 2. P. 215.
39. *Кузнецов Н.М., Банин Е.П., Крупнин А.Е. и др.* // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки 2022. Т. 6. № 105. С. 123.
<https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-123-143>