

На правах рукописи



Крупнин Артур Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСТРУЗИОННОЙ 3D-ПЕЧАТИ**

1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Научный руководитель:

Сорокин Федор Дмитриевич

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Келлер Илья Эрнстович

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) — филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН

Склезов Андрей Анатольевич

доктор технических наук, доцент, директор акционерного общества «Центр перспективных разработок».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится «17» июня 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.331.12 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: +7(499)263-66-39

Автореферат диссертации разослан « » ____ 202 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., доцент

Мурашов М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Аддитивные технологии (АТ) находят все более широкое применение в различных отраслях науки, промышленности и производства: медицине, авиа-, энерго-, приборо- и машиностроении. К основным преимуществам АТ относят скорость создания прототипов, возможность изготовления изделий с заранее заданной, зачастую сложной геометрией, уменьшение общего веса конструкции и снижение отходов производства по сравнению с традиционными субтрактивными технологиями. Наиболее распространенной в настоящее время является АТ, основанная на выращивании деталей за счет послойного наплавления нити (филамента) полимерного материала (fused deposition modeling) – экструзионная 3D-печать. Класс используемых в этой технологии материалов варьируется от низкомолекулярных полиуретанов до прочных и жестких полиэфиримидов, при этом механическое поведение конечных изделий зависит от многих параметров, включая температуру и скорость 3D-печати, высоту и ширину слоя, угол укладки волокна и других.

Пористые, в том числе гироидные, структуры, производимые методом экструзионной 3D-печати, представляют значительный интерес для тканевой инженерии, регенеративной медицины и инженерных приложений благодаря сочетанию уникальных механических, биологических и функциональных свойств. Они обладают высокими удельной прочностью и пористостью, обеспечивают оптимальные условия для адгезии, пролиферации и дифференцировки клеток, а также эффективного транспорта питательных веществ и метаболитов. Кроме того, такие архитектуры демонстрируют высокие свойства энергопоглощения за счет равномерного распределения нагрузки и высоких значений удельной площади поверхности, что делает их перспективными для создания защитных материалов и амортизирующих структур. Использование полимерных материалов и композитов на их основе позволяет точно контролировать параметры изделия, адаптируя его под конкретные задачи — от регенерации костной ткани, где гироидные структуры имитируют трабекулярную архитектуру, до разработки легких и прочных энергопоглощающих элементов в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Технология экструзионной 3D-печати обеспечивает масштабируемость и воспроизводимость производства, что расширяет возможности ее применения как в биомедицине, так и в инженерии.

При проектировании ответственных узлов, деталей, а также медицинских изделий актуальной является задача построения экспериментальных и расчетных методик оценки напряженно-деформированного состояния изделий, изготовленных с применением технологии экструзионной 3D-печати.

Цель работы заключается в решении проблемы прогнозирования напряженно-деформированного состояния образцов полимерных материалов, изготовленных с применением экструзионной 3D-печати.

Для достижения цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Выявить взаимосвязь между режимами экструзионной 3D-печати и механическими характеристиками образцов, в том числе пористых, в экспериментах на одноосное растяжение, сжатие и трехточечный изгиб;
2. Разработать и валидировать в натурном эксперименте методику прогнозирования упруго-прочностных характеристик образцов, изготовленных методом экструзионной 3D-печати, с применением теории слоистых пластин и критерия Цая-Хилла;
3. Разработать и валидировать в натурном и численном экспериментах методику достоверного определения параметров вязкоупругости и упруго-гистерезисных характеристик образцов эластомеров, изготовленных методом экструзионной 3D-печати, в испытаниях на циклическое сжатие, ползучесть и релаксацию;

4. Установить влияние геометрических параметров пористых образцов на основе гироидной поверхности на механические, в том числе упруго-гистерезисные, характеристики и проницаемость в натурном и численном экспериментах.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Продемонстрирована применимость теории слоистых пластин и критерия Цая-Хилла для прогнозирования модуля упругости и пределов прочности/текучести полимерных образцов с единой и комбинированной укладкой волокон в испытаниях на одноосное растяжение и сжатие;
2. Предложена и успешно валидирована в испытаниях на циклическое сжатие, ползучесть и релаксацию напряжений новая гибридная методика идентификации параметров моделей вязкоупругого поведения (на примере структурных реологических моделей) полиуретана;
3. Выполненное всестороннее экспериментальное исследование выявило новые закономерности о влиянии режимов экструзионной 3D-печати на анизотропию механических свойств гироидных образцов при нагружении вдоль и поперек слоев в испытаниях на одноосное растяжение, сжатие и трехточечный изгиб;
4. В условиях натурного и численного экспериментов установлена взаимосвязь между пористостью, механическими характеристиками и проницаемостью гироидных образцов из полилактида. Построено семейство кривых Гибсон-Эшби для эффективных значений модуля упругости и предела текучести в диапазоне значений пористости от 50 до 83%.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработана и экспериментально валидирована методика достоверного определения механических характеристик образцов с единой и комбинированной укладкой волокон, изготовленных методом экструзионной 3D-печати. Разработана и экспериментально валидирована методика достоверного определения параметров вязкоупругости полиуретановых образцов в широком диапазоне скоростей деформирования. Данная методика может быть распространена и на образцы, изготовленные по классическим (литье, экструзия) технологиям.

Полученные в работе результаты численных и натурных экспериментов пористых образцов на основе гироидной поверхности могут быть использованы при проектировании и разработке широкого спектра оптимизированных под конкретное применение изделий, включая персонализированные имплантаты, амортизаторы и демпферы.

Методы исследования, использованные в работе, включают классические методы механики деформируемого твердого тела, механики композиционных материалов, гидродинамики, методы конечных элементов и конечных объемов, а также методы аналитического и численного решения дифференциальных уравнений.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью и надежностью использованных математических методов, воспроизводимостью измеряемых параметров в проведенных экспериментах (включая численные), а также всесторонней экспериментальной валидацией разработанных моделей и методов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модельный подход к прогнозированию модуля упругости и пределов прочности/текучести полимерных образцов с единой и комбинированной укладкой волокон по теории слоистых пластин и критерию Цая-Хилла;

2. Комплексная методика идентификации параметров моделей вязкоупругого поведения полиуретана в широком диапазоне скоростей деформирования;
3. Результаты натурных экспериментов на одноосное растяжение, сжатие (в том числе циклическое), ползучесть, релаксацию напряжений и демонстрация успешного применения предложенных методик;
4. Результаты экспериментального исследования упруго-гистерезисных характеристик пористых гироидных полиуретановых образцов в виде кривых энергопоглощения (в том числе удельных) и значений коэффициента механических потерь;
5. Результаты расчета упруго-прочностных характеристик и проницаемости полимерных гироидных образцов из полилактида в широком диапазоне значений пористости, а также верификация полученных результатов.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы представлены на 12 конференциях:

Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на 12 конференциях:

1. XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2018), г. Москва, 2018 г.
2. XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021), г. Москва, 2021 г.
3. XVIII Международная научно-практическая конференция «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения», пос. Эльбрус, 2022 г.
4. V Национальный Конгресс по Регенеративной Медицине, г. Москва, 2022 г.
5. XIX Международная научно-практическая конференция «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения», пос. Эльбрус, 2023 г.
6. IX Бакеевская Всероссийская с международным участием школа-конференция для молодых ученых «макромолекулярные нанообъекты и полимерные композиты», г. Тула, 2023 г.
7. XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2023), г. Москва, 2023 г.
8. 8 Азиатский симпозиум по современным материалам 8th Asian Symposium on Advanced Materials (ASAM-8), г. Новосибирск, 2023 г.
9. Девятая Всероссийская Каргинская Конференция «Полимеры 2024», г. Москва, 2024 г.
10. 66-ая Всероссийская научная конференция МФТИ, г. Москва, 2024 г.
11. Межкафедральный семинар по прикладной и теоретической механике и численным методам моделирования (Москва, 2025 г.)
12. II-я Международная конференция «Механика биомедицинских материалов и устройств» (МБМУ-2025), 15-17 июля 2025 г., г. Пермь

Публикации. Содержание диссертации отражено в 15 научных работах, из них 4 в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для публикации результатов исследований на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем составляет 183 страницы, 76 рисунков и 18 таблиц. Список литературы составляет 284 наименования.

Личный вклад. Все основные результаты диссертации получены автором лично, включая планирование и проведение натурных и численных экспериментов, разработку методик и построение математических моделей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность темы исследования, ее научная новизна, определены цель и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту, степень достоверности, полнота опубликования в печати, апробация результатов. Приведена краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов и представлены методы исследования, использованные в диссертации.

В **первой главе** представлена краткая история появления и развития аддитивных технологий, их применение в различных сферах науки и техники. Рассмотрены основные технологии с отдельным акцентом на экструзионной 3D-печати методом послойного наплавления прутка. Детально обсуждается влияние параметров технологического процесса на механические характеристики изделий. Приведены иллюстрации и примеры применения аддитивных технологий в задачах воссоздания биоподобных структур живой природы, включая пористую архитектуру. Представлены современные методы создания пористых (мета-)материалов и изделий из них. Подробно описывается возможность изготовления пористых структур с применением гироидной поверхности.

Вторая глава посвящена разработке и валидации в натурном эксперименте методики прогнозирования упруго-прочностных характеристик образцов, изготовленных методом экструзионной 3D-печати, с применением теории слоистых пластин и критерия Цая-Хилла.

Выражение критерия Цая-Хилла в общем виде имеет следующий вид:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{W^2} = 1, \quad (1)$$

где X , Y – пределы прочности при растяжении в направлении 1 (вдоль волокон) и 2 (перпендикулярно волокнам), соответственно; W – предел прочности на сдвиг.

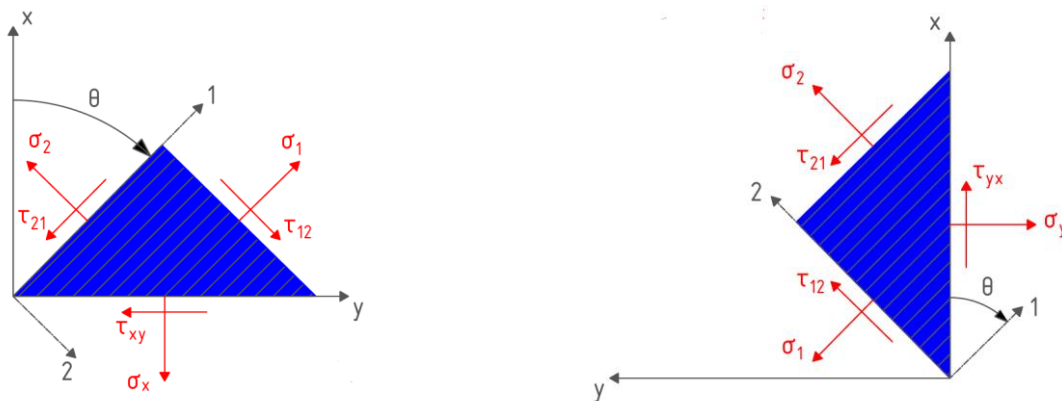


Рисунок 1. Выбор отсчета угла θ

При повороте системы координат на угол θ (рисунок 1) при плоском напряженном состоянии соотношение для преобразования компонент тензора напряжений имеет следующий вид:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T_1] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

где $c = \cos \theta, s = \sin \theta$.

При одноосном нагружении $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$. Тогда можно получить зависимость предела прочности от угла укладки θ :

$$\sigma_x^{max}(\theta) = \left[\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left(\frac{1}{W^2} - \frac{1}{X^2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Первый метод

Выражая из (3) W , получаем:

$$W_1 = \left[\frac{1}{(\sigma_x^{max})^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta} - \frac{1}{X^2} \frac{\cos^2 \theta}{\sin^2 \theta} - \frac{1}{Y^2} \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} + \frac{1}{X^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Пределы прочности при растяжении в направлениях 1 и 2 определяются по результатам стандартных испытаний. Далее рассмотрены 2 метода определения предела прочности при сдвиге W .

Выбрав предел прочности на растяжение образца с укладкой $\theta = 45^\circ$, получим:

$$W_1 = \left[\frac{4}{(\sigma_x^{max})^2} - \frac{1}{Y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Второй метод

Предел прочности на сдвиг может быть вычислен из формулы по стандарту ASTM D-3518:

$$W_2 = \frac{F_{\theta=45^\circ}}{2S} \quad (6)$$

где $F_{\theta=45^\circ}$ – максимальное значение нагрузки при испытании образца с укладкой $\theta = 45^\circ$, S – площадь поперечного сечения образца.

Связь между напряжениями и деформациями в осях x - y :

$$\{\sigma_{xy}\} = [E^*] \{\varepsilon_{xy}\}; \quad (7)$$

Для ортотропного тела в условиях плоского напряженного состояния:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{21} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Коэффициенты матрицы упругих модулей в выражении (8) можно переписать через технические постоянные упругости:

$$\begin{aligned} E_{11} &= \frac{E_1^2}{E_1 - \nu_{12}^2 E_2}; E_{12} = \frac{\nu_{12} E_1 E_2}{E_1 - \nu_{12}^2 E_2}; \\ E_{22} &= \frac{E_1 E_2}{E_1 - \nu_{12}^2 E_2}; E_{66} = G_{12}. \end{aligned} \quad (9)$$

где E_1 , E_2 – модули упругости в направлении 1 (вдоль волокон) и 2 (перпендикулярно волокнам), соответственно; G_{12} – модуль сдвига; ν_{12} – коэффициент Пуассона.

Количество независимых технических констант, необходимых для полного определения матрицы податливостей для ортотропного материала при плоском напряженном состоянии, сокращается до четырёх.

Используя связь матричных и тензорных обозначений деформаций, а также формулы обратных преобразований, можно получить зависимость между напряжениями и деформациями:

$$\{\sigma_{xy}\} = [T_1][E][T_2]^{-1}\{\varepsilon_{xy}\} = [E^*]\{\varepsilon_{xy}\}, \quad (10)$$

где

$$[T_2] = [\Omega][T_1][\Omega]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -sc \\ s^2 & c^2 & sc \\ 2sc & -2sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В случае одноосного нагружения $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ и Модуль упругости в направлении действия нагрузки может быть выражен следующим образом:

$$E_x(\theta) = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{1}{S_{11}^*} = \left[\frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 2\theta \right]^{-1} \quad (12)$$

Модули упругости E_1 и E_2 определялись из испытаний образцов с укладкой волокон, параллельной и перпендикулярной нагрузке, соответственно. Модуль упругости сдвиговой деформации определялся с помощью соотношения (12). Для угла укладки 45° можно выразить G_{12} :

$$G_{12} = \left[\frac{4}{E_x^{45^\circ}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right]^{-1}, \quad (13)$$

где $E_x^{45^\circ}$ известен из испытаний образца с соответствующей укладкой.

Образцы для испытаний на одноосное растяжение и сжатие изготовлены в соответствии с ISO 527 и ASTM D695. Для определения коэффициента Пуассона ν_{12} методом цифровой корреляции изображений использовано программное обеспечение GOM Correlate. На рабочую

часть исследуемого образца с углом укладки $\theta = 0^\circ$ наносился растр (черная эмалевая краска). Съемка образца производилась в диапазоне упругих деформаций с постоянным шагом по времени, равным 0,5 с. Далее в плоскости рабочей части рассчитывали деформации и коэффициент Пуассона:

$$\nu_{12} = 0,323 \quad \nu_{21} = 0,214 \quad (14)$$

В соответствии с симметрией упругих постоянных:

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{12} = 0,194 \quad (15)$$

Погрешность определения ν_{12} с использованием связи (15) составила 9,3%.

На рисунке 2 показаны экспериментальные и теоретические результаты оценки модуля упругости и пределов прочности/текучести.

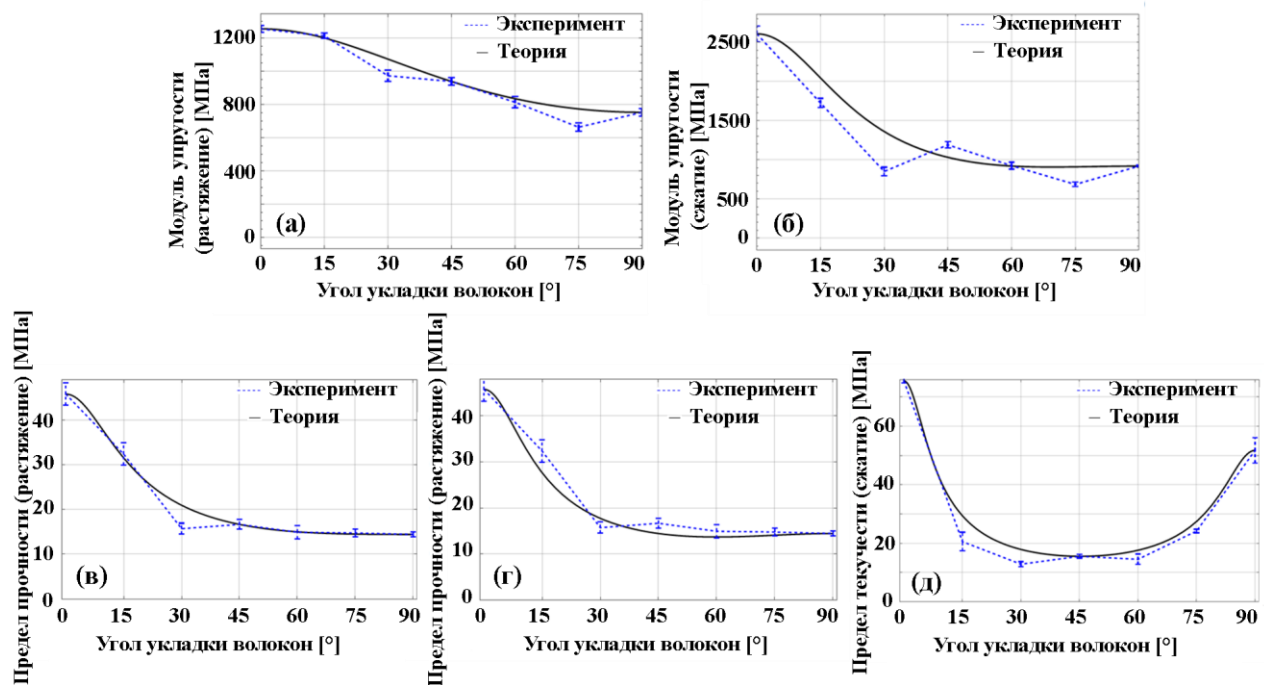


Рисунок 2. Результаты испытаний: (а) – модуль упругости при растяжении, (б) – модуль упругости при сжатии, (в) – предел прочности при растяжении с применением соотношения W_1 , (г) – предел прочности при растяжении с применением соотношения W_2 , (д) – предел текучести при сжатии

Видно, что теоретическая модель хорошо предсказывает значения модуля упругости при растяжении во всем диапазоне углов укладки волокна. Более высокие теоретические значения для образцов с $\theta = 30^\circ$ и $\theta = 75^\circ$ могут быть вызваны концентрацией напряжений вблизи захватов испытательной машины. Относительные ошибки в этих случаях составляют менее 15%. Экспериментальные результаты определения модуля упругости при сжатии меньше коррелируют с теоретической оценкой. Это может быть связано с наличием трения между поверхностями образца и пластин испытательной машины, а также с потерей устойчивости образцов во время испытания. Оценка, полученная с помощью соотношения W_1 , хорошо предсказывает предел прочности при растяжении для всех значениях угла укладки волокна, кроме $\theta = 30^\circ$ (рисунок 2в). Поскольку разрушение этих образцов происходит вблизи захватов, это вызывает концентрацию напряжений и, как следствие, заниженное значение предела прочности. Результаты, полученные вторым методом для предела прочности при сдвиге W ,

также хорошо согласуются с экспериментальными (рисунок 2г). Тем не менее, эти результаты незначительно отличаются от экспериментальных, поэтому для оценки предела текучести при сжатии был использован первый метод. Применение критерия Цая-Хилла позволяет хорошо предсказать значения предела текучести при сжатии (рисунок 2д). Как видно из результатов, критерий Цая-Хилла дает завышенное значение предела текучести при сжатии.

На рисунке 3 показаны результаты расчета модуля упругости для композитных пластин с различным углом укладки волокна в соответствии с теорией слоистых пластин.

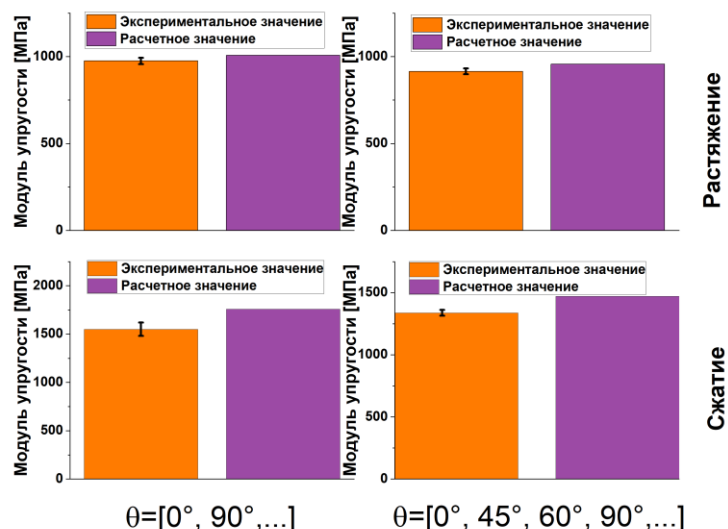


Рисунок 3. Результаты испытаний образцов с комбинированной укладкой волокна

Результаты теоретических и экспериментальных расчетов отлично коррелируют друг с другом. При испытаниях на растяжение ошибки для композитов составили 3,3% и 4,4%, соответственно. При испытаниях на сжатие ошибки для композитов составили 11,9% и 9%, соответственно. Таким образом, теория слоистых пластин позволяет прогнозировать значения жесткости образцов при растяжении и сжатии с хорошей инженерной точностью.

В **третьей главе** предложена гибридная методика идентификации параметров моделей вязкоупругого поведения (на примере структурных реологических моделей) полиуретана в условиях циклического сжатия, ползучести и релаксации.

Использованы математические модели вязкоупругости (рисунок 4) на основе моделей Зенера (3 параметра, SLS), Бюргерса (4 параметра, BURG) и Максвелла (5 параметров, GM).

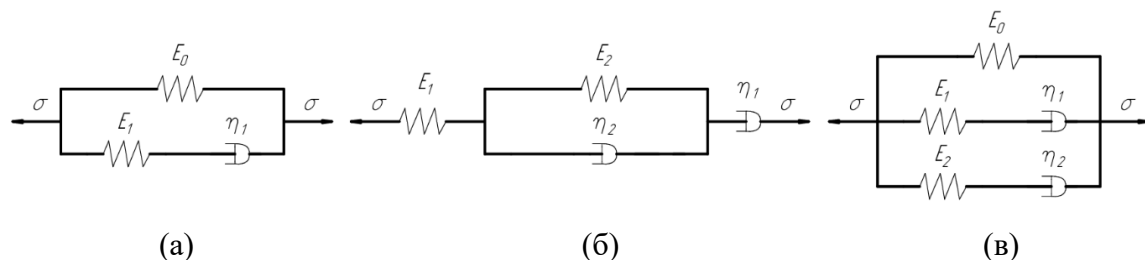


Рисунок 4. Структурные реологические модели: (а) SLS, (б) BURG, (в) GM

В каждой из этих моделей E_i , η_i представляют собой сосредоточенные параметры, подлежащие определению по результатам серии экспериментов. Далее приводится общий вид

дифференциальных уравнений (ДУ), описывающих каждую из этих моделей и решения для частных случаев нагружения.

Модель Зенера:

ДУ выглядит следующим образом:

$$\dot{\sigma} + \frac{E_1}{\eta_1} \sigma = (E_0 + E_1) \dot{\varepsilon} + \frac{E_0 E_1}{\eta_1} \varepsilon \quad (16)$$

При постоянной скорости деформирования напряжение зависит от деформаций следующим образом:

$$\sigma(\varepsilon) = \dot{\varepsilon} \left(\eta_1 - \eta_1 \cdot \exp \left(-\frac{E_1 \varepsilon}{\eta_1 \dot{\varepsilon}} \right) + E_0 \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}} \right) \quad (17)$$

Для описания процесса ползучести решение ДУ имеет вид:

$$\varepsilon_{creep}(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \left(1 - \frac{E_1}{E_0 + E_1} \exp \left(-\frac{t}{\tau_c} \right) \right) \quad (18)$$

где $\tau_c = \eta_1 \frac{E_0 + E_1}{E_0 E_1}$ — время запаздывания деформаций.

Релаксация напряжений описывается решением вида:

$$\sigma_{relaxation}(t) = \varepsilon_0 \left(E_0 + E_1 \exp \left(-\frac{t}{\tau_r} \right) \right) \quad (19)$$

где $\tau_r = \frac{\eta_1}{E_1}$ — время релаксации.

Модель Бюргерса:

ДУ выглядит следующим образом:

$$\ddot{\sigma} + \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{E_1 E_2}{\eta_2 \eta_1} \sigma = E_1 \ddot{\varepsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta_2} \dot{\varepsilon} \quad (20)$$

При постоянной скорости деформирования напряжение зависит от деформаций следующим образом:

$$\sigma(\varepsilon) = \dot{\varepsilon} \cdot \frac{b \eta_1 - E_1}{a - b} \cdot \exp \left(-a \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}} \right) + \dot{\varepsilon} \left(-\eta_1 - \left(\frac{b \eta_1 - E_1}{a - b} \right) \right) \cdot \exp \left(-b \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}} \right) + \eta_1 \dot{\varepsilon} \quad (21)$$

Для описания процесса ползучести решение ДУ имеет вид:

$$\varepsilon_{creep}(t) = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{\eta_2}{E_2 \eta_1} \left(1 - \exp \left(-\frac{E_2 t}{\eta_2} \right) \right) \right) \quad (22)$$

Релаксация напряжений описывается решением вида:

$$\sigma_{relaxation}(t) = \frac{E_1 \varepsilon_0}{\sqrt{a^2 - 4b}} \cdot (r_1 \cdot e^{r_2 t} - r_2 \cdot e^{r_1 t}) \quad (23)$$

где a, b, r_1, r_2 зависят от сосредоточенных параметров модели.

Модель Максвелла:

ДУ выглядит следующим образом:

$$\ddot{\sigma} + \frac{E_1\eta_2 + E_2\eta_1}{\eta_2\eta_1} \dot{\sigma} + \frac{E_1E_2}{\eta_2\eta_1} \sigma = E_0E_1E_2\ddot{\varepsilon} + E_0 \left(\frac{E_1\eta_2 + E_2\eta_1}{\eta_2\eta_1} \right) \dot{\varepsilon} + \frac{E_0E_1E_2}{\eta_2\eta_1} \varepsilon \quad (24)$$

При постоянной скорости деформирования напряжение зависит от деформаций следующим образом:

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon \left(\eta_1 - \eta_1 \exp\left(-\frac{E_1\varepsilon}{\eta_1\dot{\varepsilon}}\right) + E_0 \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}} + \eta_2 - \eta_2 \exp\left(-\frac{E_2\varepsilon}{\eta_2\dot{\varepsilon}}\right) \right) \quad (25)$$

Для описания процесса ползучести решение ДУ имеет вид:

$$\varepsilon_{creep}(t) = C_1 \exp(l_1 t) + C_2 \exp(l_2 t) + \frac{\sigma_0}{E_0} \quad (26)$$

где C_1, C_2, l_1, l_2 зависят от сосредоточенных параметров модели.

Релаксация напряжений описывается решением вида:

$$\sigma_{relaxation}(t) = E_0\varepsilon_0 + (E_1 + E_2)\varepsilon_0 \cdot \frac{p_1 \cdot e^{p_2 t} - p_2 \cdot e^{p_1 t}}{p_1 - p_2} \quad (27)$$

где p_1, p_2 зависят от сосредоточенных параметров модели.

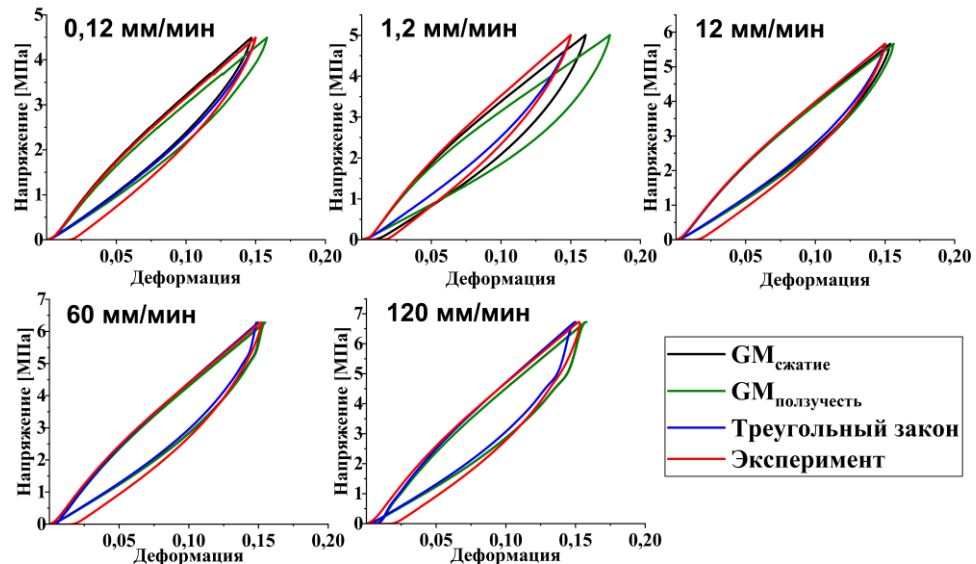


Рисунок 5. Кривые одноосного сжатия на первом цикле для обобщенной модели Максвелла: красные линии – эксперимент, синие – модель с параметрами, определенными при треугольном законе (ТЗ) изменения деформаций от времени, зеленые – модель с параметрами, полученными по результатам эксперимента на ползучесть, черные – модель с параметрами, определенными по результатам одноосного сжатия

Механические испытания проведены в соответствии с ГОСТ 20014-13. Скорости деформирования принимались равными 120 мм/мин, 60 мм/мин, 12 мм/мин, 1,2 мм/мин, 0,12

мм/мин. Образцы были подвергнуты циклическому нагружению по треугольному закону до деформации 15% с последующей разгрузкой до 0.

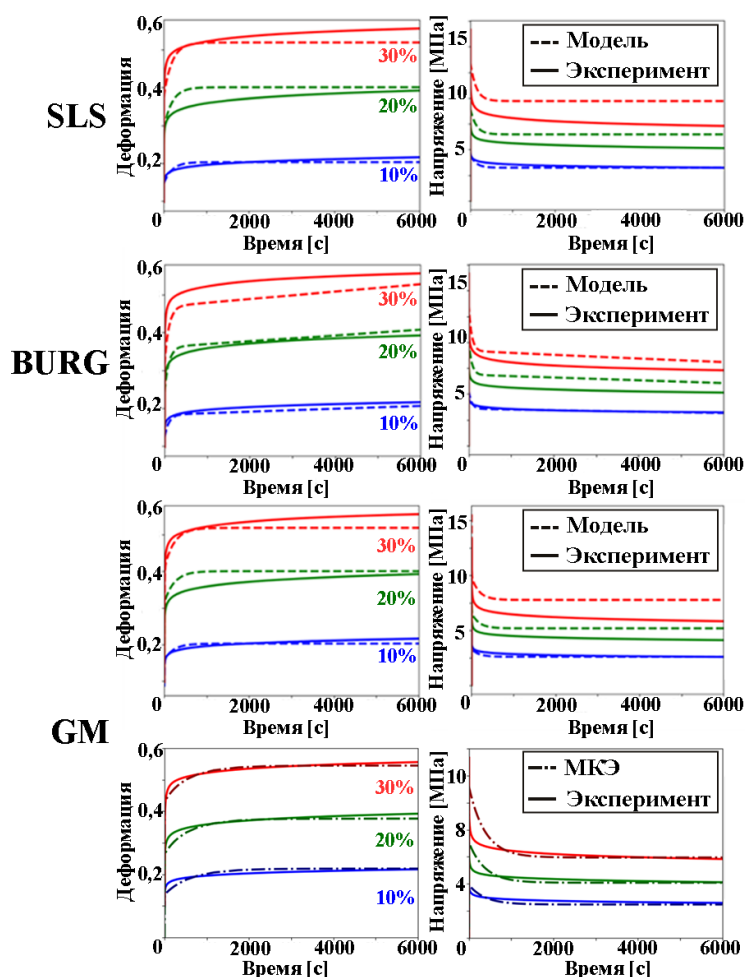


Рисунок 6. Модельные и экспериментальные кривые ползучести и релаксации

Механические испытания на ползучесть и релаксацию напряжений проведены для трех уровней напряжений. Время каждого испытания составило 100 минут. Для каждой из моделей проведен подбор параметров на основе данных, полученных из испытаний на ползучесть при трех уровнях нагружения. Проведена валидация по данным эксперимента на релаксацию напряжений с найденными ранее параметрами. На основе определенных значений параметров вязкоупругости для всех реологических моделей и скоростей деформирования получены теоретические законы нагружения с последующей разгрузкой в материале на первом цикле и использованием двух наборов параметров. Теоретические и экспериментальные кривые циклического нагружения приведены на рисунке 5. Кривые ползучести и релаксации напряжений для всех моделей

представлены на рисунке 6. Для модели Максвелла проведено численное моделирование процессов ползучести и релаксации напряжений в конечно-элементном комплексе ANSYS Workbench. Использован восьмиузловой конечный элемент PLANE183 размером 1 мм, который был определен по результатам теста на сходимость. В результате модель состояла из 320 элементов и 399 узлов. Для моделирования вязкоупругого поведения использованы модель Муни-Ривлина 3-го порядка и ряды Прони. Решение состояло из двух подшагов: на первом шаге мгновенно прикладывалась нагрузка – перемещение или напряжение в зависимости от процесса таким образом, чтобы деформации составили 10%, 20% и 30% от высоты образца, на втором шаге происходило удержание нагрузки на протяжении 100 минут. Видно, что предложенная методика определения параметров вязкоупругости позволяет достоверно предсказывать поведение образцов при различном нагружении независимо от временного масштаба.

В четвертой главе проведено исследование влияния геометрических параметров пористых образцов на основе гироидной поверхности на механические, в том числе упруго-гистерезисные, характеристики и проницаемость в натурном и численном экспериментах,

включая оценку разнсопротивляемости и анизотропии механических свойств образцов в зависимости от режима экструзионной 3D-печати. На примере гироидной поверхности (28) построены модели пористых образцов в диапазоне пористости 50-83% (рисунок 7а).

$$\cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{a}y\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{a}y\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{a}z\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{a}z\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) - t = 0 \quad (28)$$

где a – параметр, отвечающий за период функции и за размер элементарной ячейки; t – параметр, отвечающий за размер пор. Например, модель “G6_075” обозначает модель гироида с размером ячейки $a = 6$ мм и параметром связности $t = 0,75$.

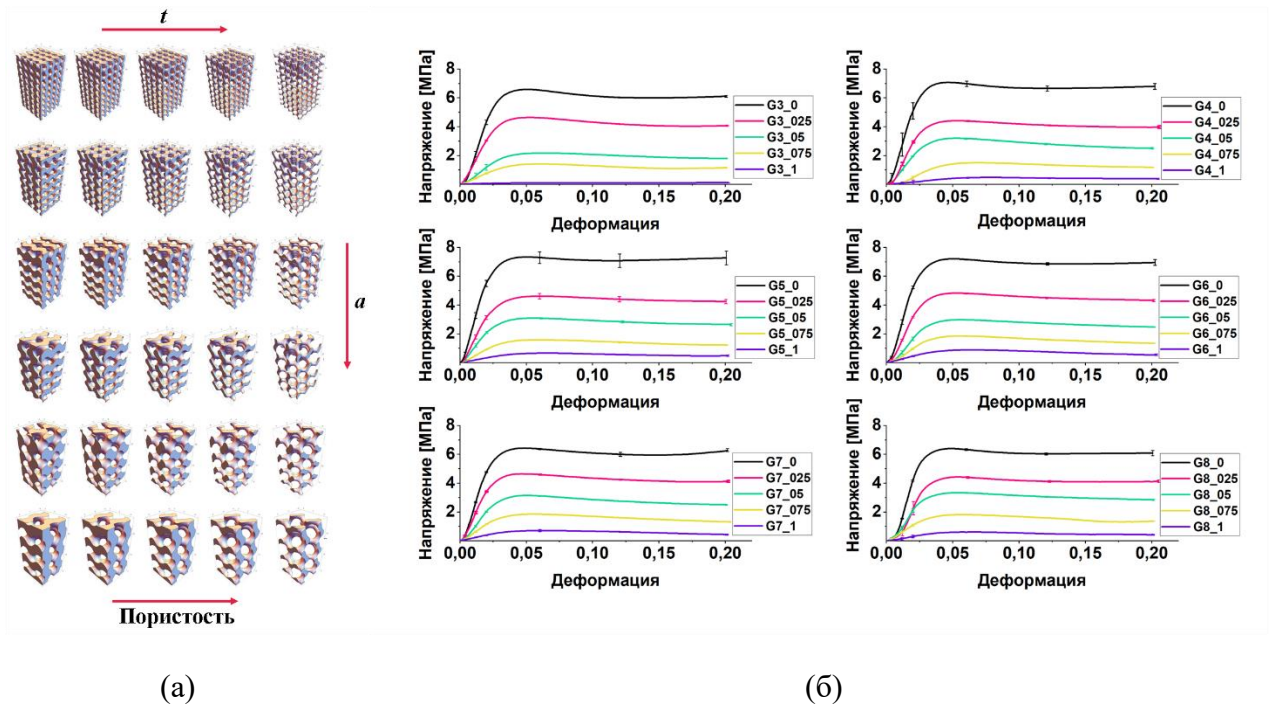
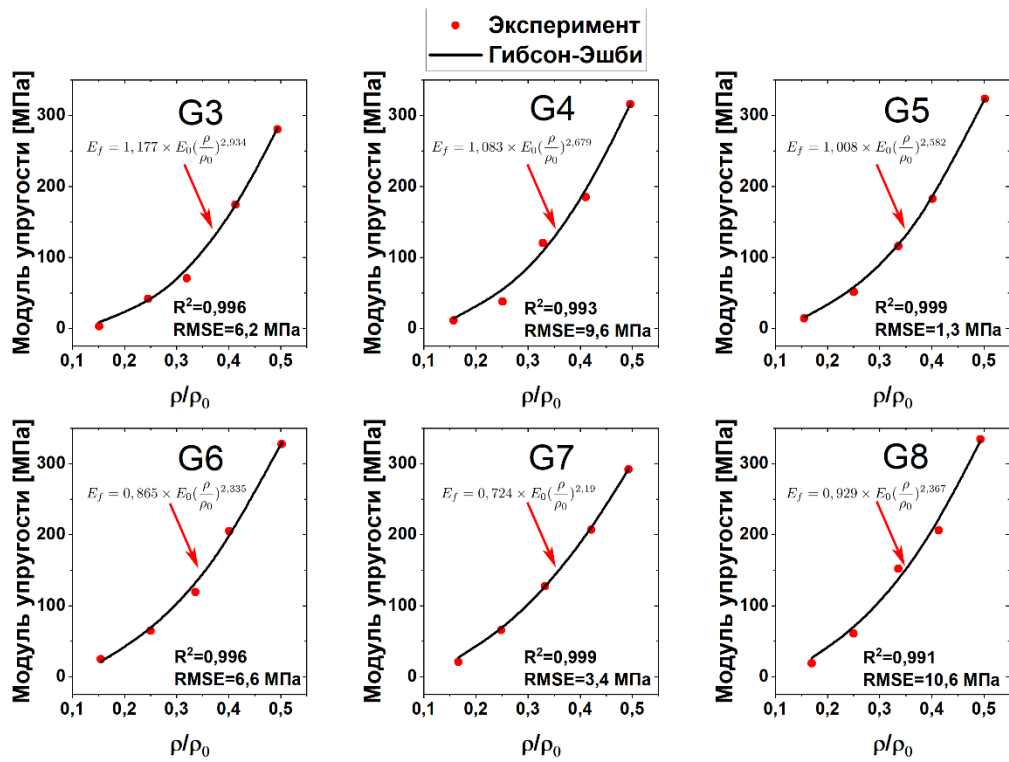


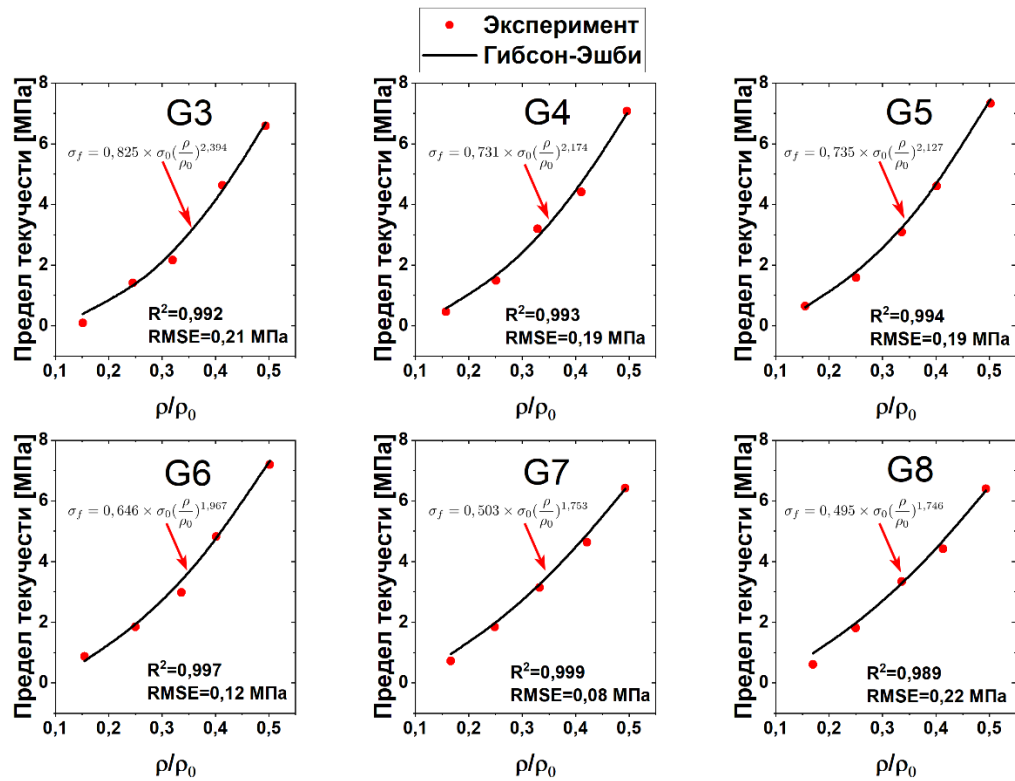
Рисунок 7. (а) – модели гироидных образцов, (б) – результаты испытаний на одноосное сжатие

Механические испытания скаффолдов в условиях одноосного сжатия проведены в соответствии со стандартом ASTM D695-23 при постоянной скорости деформирования 1 мм/мин и температуре 37°C. Предварительно образцы термостатировали при температуре испытаний в течение 30 мин. По результатам испытаний определяли модуль упругости E и предел текучести σ_t как тангенс угла наклона линейного участка на условной диаграмме деформирования материала и напряжение, при котором кривая $\sigma=\sigma(\epsilon)$ выходит на плато. Кривые одноосного сжатия представлены на рисунке 7б. Видно, что упруго-прочностные характеристики существенно зависят от значения пористости в пределах одного размерного ряда ячейки, но практически не зависят от размера ячейки при постоянном значении пористости. Максимальное значение модуля упругости составило 330,3 МПа для модели G6_0, минимальное – 2,6 МПа для G3_1. Максимальное значение предела текучести составило 7,33 МПа для модели G5_0, минимальное – 0,10 МПа для G3_1.

Кривые Гибсон-Эшби для рассмотренных конструкций скаффолдов представлены на рисунке 8.



(а)



(б)

Рисунок 8. Кривые Гибсон-Эшби: (а) – модуль упругости, (б) – предел текучести

Экспериментальное исследование упруго-гистерезисных характеристик пористых полиуретановых образцов проведено по результатам циклических испытаний на одноосное сжатие; рассчитаны значения коэффициента механических потерь, построены функции эффективного, а также удельного по массе и по объему поглощения энергии. Механические испытания образцов проведены в соответствии с ГОСТ 20014-83 при комнатной температуре и постоянной скорости 100 мм/мин до значения деформации 50% и последующей разгрузкой до 5% по треугольному циклу.

На рисунке 9 представлены результаты циклических испытаний пористых образцов.

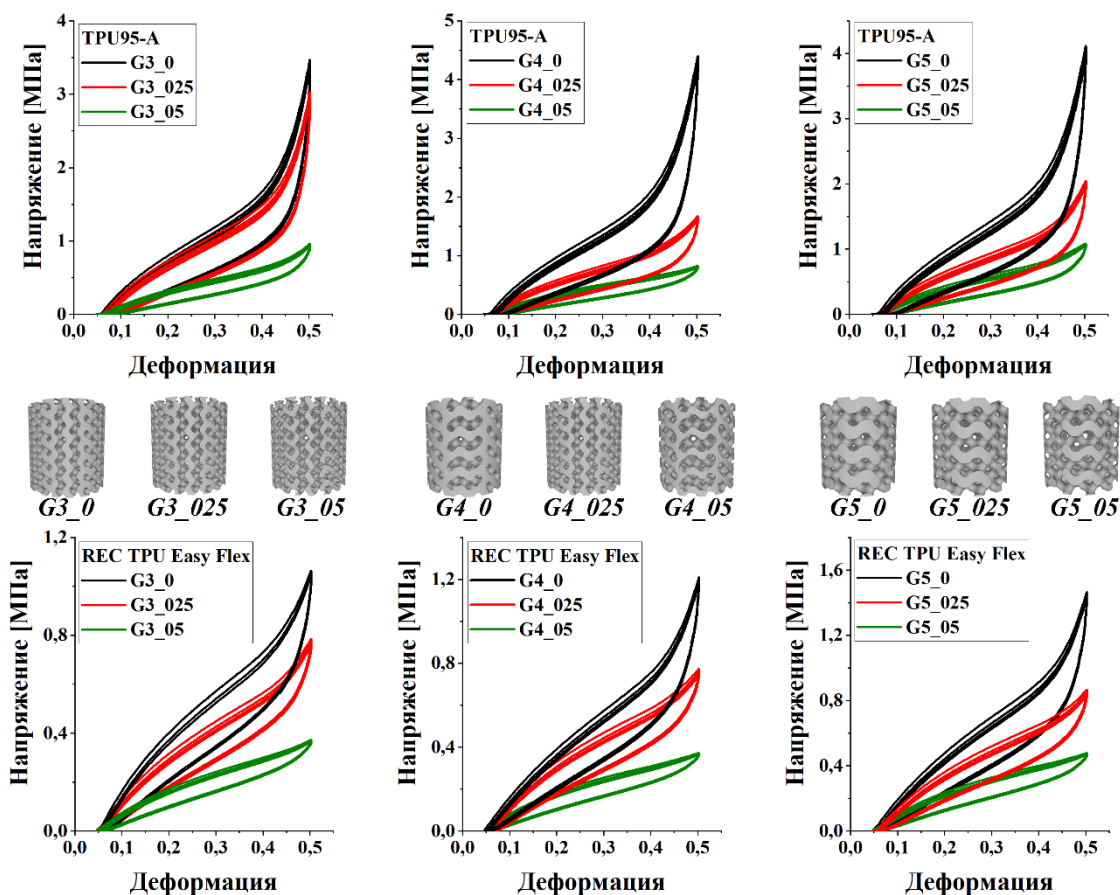


Рисунок 9. Кривые одноосного сжатия гироидных образцов из полиуретана

Видно, что для всех испытанных образцов имеется зависимость упругих свойств как от размера ячейки, так и от параметра связности. Значения модуля упругости для образцов TPU95-A (жесткий полиуретан) изменялись в диапазоне от 2,2 МПа до 6,5 МПа, для образцов TPU Easy Flex (мягкий полиуретан) – от 0,9 МПа до 3,0 МПа. Таким образом, предложенные конструкции пористых полиуретановых гироидных образцов обладают повышенными упруго-гистерезисными характеристиками, свойства которых могут быть гибко настроены в зависимости от сферы применения и диапазона рабочих нагрузок.

Для оценки применимости пористых гироидных образцов в качестве клеточных каркасов для регенерации костных тканей проведены расчеты проницаемости k по закону Дарси и осредненных сдвиговых напряжений (averaged wall shear stresses) у стенки в программном комплексе ANSYS CFX. Задача протекания культуральной среды плотностью

1000 кг/м³ и динамической вязкостью 1,345 мПа·с решена в стационарном режиме. Режим течения – ламинарный. В качестве граничных условий на входе задана скорость течения – 0,1 мм/с, на выходе – нулевое статическое давление. На рисунке 10 представлены результаты серии численных расчетов проницаемости k и сдвиговых напряжений у стенки AWSS (averaged wall shear stress).

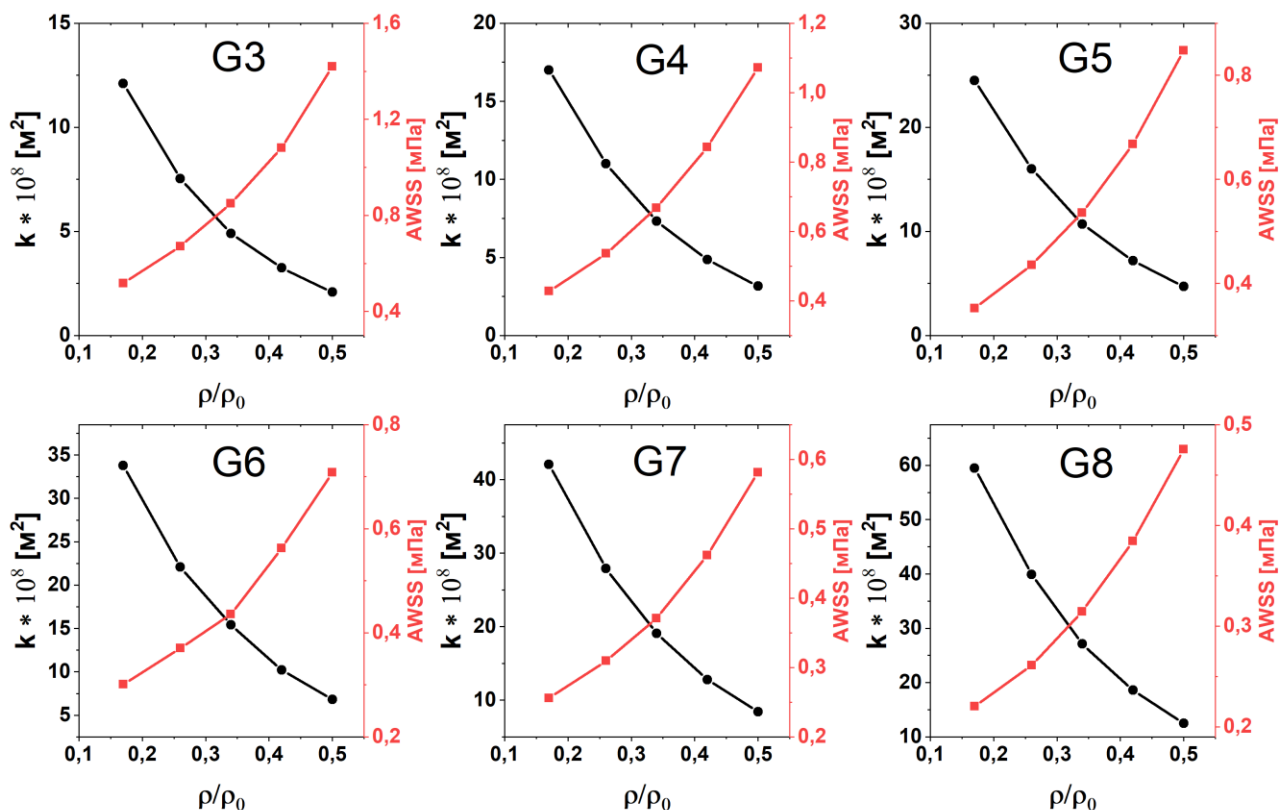


Рисунок 10. Результаты численной оценки проницаемости k (черные линии) и осредненных сдвиговых напряжений у стенки AWSS (красные линии)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные выводы диссертационной работы состоят в следующем:

1. Предложена экспериментально валидированная методика прогнозирования упруго-прочностных характеристик полимерных образцов с единой и комбинированной укладкой волокон. По результатам широкого спектра проведенных натурных испытаний на одноосное растяжение и сжатие продемонстрирована высокая эффективность предложенной методики с возможностью снижения минимально необходимого количества экспериментальных образцов. При испытаниях на растяжение погрешность для образцов с комбинированной укладкой волокон не превосходила 4,4%; при испытаниях на сжатие – 11,9%.
2. Предложена экспериментально валидированная гибридная методика идентификации единого набора параметров вязкоупругого поведения (на примере структурных реологических моделей Зенера, Бюргерса и Максвелла) на примере образцов

полиуретана, находящихся в условиях циклического сжатия, ползучести и релаксации напряжений. Показано, что определенный единый набор параметров позволяет количественно и качественно описывать процессы циклического сжатия в широком диапазоне скоростей деформирования (0,12 – 120 мм/мин), а также удовлетворительно моделировать процессы ползучести и релаксации в широком диапазоне начальных значений деформаций и напряжений. Отдельно реализована процедура переопределения параметров вязкоупругости для требуемого цикла(-ов) деформирования образца.

3. Программная реализация предложенной по п.2 методики обладает высоким быстродействием по сравнению с реализацией в конечно-элементных комплексах. Показано, что применение треугольного закона изменения деформаций от времени при циклическом сжатии позволяет с высокой степенью корреляции определять значения рассеиваемой за 1-й и 2-й цикл энергии, а также сократить время решения задачи идентификации параметров вязкоупругости.
4. Проведено всестороннее исследование упруго-прочностных характеристик гироидных образцов в натурных испытаниях на одноосное растяжение, сжатие, трехточечный изгиб и трещиностойкость. Продемонстрирована существенная разнсопротивляемость и анизотропия механических свойств образцов в зависимости от режима экструзионной 3D-печати. Так, максимальные значения коэффициентов разномодульности и разноточности составляют 0,27 и 0,14, соответственно; коэффициентов анизотропии – 1,71 и 3,32, соответственно, что необходимо учитывать при рациональном проектировании и расчете деталей и узлов, изготовленных с применением экструзионной 3D-печати.
5. Установлены зависимости между значением пористости (50–83%) и упруго-гистерезисными характеристиками гироидных образцов на основе «жесткого» и «мягкого» полиуретанов, что позволяет определить коэффициент механических потерь, построить функции эффективного, удельного по массе и объёму поглощения энергии, изучить влияние размера ячейки и пористости на данные характеристики, а также выявить режимы деформирования с максимальной эффективностью энергопоглощения, что позволяет рационально выбирать геометрию изделия и диапазон рабочих нагрузок.
6. Установлены зависимости между значением пористости (50–83%) и упруго-прочностными характеристиками, осредненными сдвиговыми напряжениями и проницаемостью гироидных образцов на основе полилактида; с высокой степенью корреляции определены параметры кривых Гибсон-Эшби для значений модуля упругости и предела текучести. Широкий набор проведенных натурных и численных экспериментов позволяет оптимизировать конструкцию клеточного каркаса-скаффолда как по механическому (соответствие механических характеристик имплантата аналогичным механическим характеристикам нативной губчатой костной ткани конкретного сегмента скелета), так и биологическому (соответствие проницаемости и пороговых значений сдвиговых напряжений) критериям.
7. Результаты диссертационного исследования внедрены в научно-исследовательскую деятельность НИЦ «Курчатовский институт» и учебный процесс кафедры прикладной механики МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Полученные в диссертационной работе результаты составляют задел в экспериментальной механике материалов и конструкций, изготовленных с применением экструзионной 3D-печати, в том числе для решения задач тканевой инженерии и регенеративной хирургии, что

соответствует развитию технологии разработки медицинских изделий нового поколения, включая биогибридные и бионические технологии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. A Hybrid Experimental-Numerical Framework for Identifying Viscoelastic Parameters of 3D-Printed Polyurethane Samples: Cyclic Tests, Creep/Relaxation and Inverse Finite Element Analysis/ Golovkin N.A., Nikulenkova O.V., Pobezhimov V.V., Nesmelov A.A., Chvalun S.N., Sorokin F.D., Krupnin A.E.// CMC-Computers, Materials & Continua, Vol.86, No.3, pp. 1-18, 2026, DOI:10.32604/cmc.2025.073161/ (2,00 п.л. / 1,05 п.л.)
2. Numerical and experimental study of the effect of 3D printing modes and stress concentrator on the strength and stiffness of laminate polylactide composites / V.A. Guschin, B.V. Kolesnikov, N. A. Golovkin, V.V. Pobezhimov, A.A. Nesmelov, E.R. Charchyan, A.E. Krupnin // AIP Conference Proceedings. 2025. Vol. 3205, Is. 1. C. 070001. (0,33 п.л. / 0,17 п.л.)
3. Theoretical and Experimental Investigation of 3D-Printed Polylactide Laminate Composites' Mechanical Properties / A.E. Krupnin, A.R. Zakirov, N.G. Sedush [et al.] // Materials. 2023. Vol. 16, Is. 22. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/22/7229> (дата обращения: 11.02.2026). (0,91 п.л. / 0,46 п.л.)
4. Mechanical properties and anisotropy evaluation of FDM-printed porous gyroid biodegradable PLA-Scaffolds / A.E. Krupnin, A.A. Azarov, S.D. Gershbaum [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2697, № 1. – P. 060001. – DOI: 10.1063/5.0112042. (0,31 п.л. / 0,16 п.л.)
5. Влияние параметров гироидной поверхности на проницаемость скаффолдов: численный эксперимент / Т.Е. Григорьев, А.Е. Крупнин, А.А. Шкуренок // Труды 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ: Нано-, био-, информационные, когнитивные и социогуманитарные науки и технологии, 1–6 апреля 2024 г., Москва. – М. : Физматкнига, 2024. – С. 50-51. – 94 с. (0,08 п.л. / 0,05 п.л.)
6. Головкин Н.А., Крупнин А.Е., Никуленкова О.В. [и др.]. Математическое моделирование вязкоупругого поведения полиуретана, изготовленного с применением экструзионной 3D-печати // Труды XXXVI Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2024). Москва: Изд-во ИМАШ РАН. 2024. С. 269–273. (0,29 п.л. / 0,15 п.л.)
7. Влияние параметров гироидной поверхности на пористость и механические свойства биоразлагаемых биосовместимых полимерных скаффолдов, изготовленных с применением 3D-печати / А.Е. Крупнин, О.В. Никуленкова, А.А. Шкуренок [и др.] // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения [Текст]: Материалы XIX Международной научно-практической конференции, 3–8 июля 2023 года, ЭУНК КБГУ, п. Эльбрус. – Нальчик: Издательство «Принт Центр», 2023. – С. 220. – 504 с. (0,06 п.л. / 0,04 п.л.)
8. Крупнин А.Е., Седуш Н.Г. Влияние степени кристалличности и масштабного фактора на прочность и жесткость полимерных слоистых композитов на основе полилактида, изготовленных с применением 3D-печати // Сборник тезисов IX Бакаевской Всероссийской с международным участием школы-конференция для молодых ученых «Макромолекулярные нанообъекты и полимерные композиты». Тула. 2023. С. 182. (0,06 п.л. / 0,04 п.л.)