

УДК 539.3
PACS 46.00.00, 62.20.-x, 81.70.Bt

Анализ механических свойств полиуретановых материалов, изготовленных по растворной и литьевой технологиям

В. Д. Кислицын¹, В. В. Шадрин^{1,2}, И. В. Осоргина^{1,2}, А. Л. Свистков^{1,2}

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, ул. Академика Королёва, 1
email: kislitsynvd@mail.ru

Экспериментально исследуются физико-механические свойства полиуретановых материалов с разными рецептурами состава, изготовленных с применением растворной и литьевой технологий. Проведено несколько серий механических одноосных испытаний полиуретановых образцов, в которых были использованы различные алгоритмы деформирования. Выполненные испытания были как стандартными (вплоть до разрыва образцов и с нарастающей амплитудой), так и уникальными (испытания с вложенными циклами). Качественно проанализированы данные, полученные в процессе экспериментов. Показано, что полиуретаны, изготовленные по растворной технологии, являются более эластичными, менее жесткими, размягчаются сильнее по сравнению с образцами, изготовленными с применением литьевой технологии. Смоделированы упругие свойства рассмотренных материалов при помощи введенного упругого потенциала, являющегося обобщением упругого потенциала Джента. В результате построены теоретические кривые равновесного (квазистатического) деформирования полиуретановых материалов. Проведено сравнение данных, полученных в результате механических испытаний, с теоретическими расчётами. Установлена целесообразность моделирования упругого поведения полиуретановых материалов с помощью обобщения потенциала Джента.

Ключевые слова: полиуретаны; равновесная кривая; упругий потенциал

Поступила в редакцию 18.10.2019; принята к опубликованию 30.11.2019

Analysis of the mechanical properties of polyurethane materials manufactured by mortar and injection technology

V. D. Kislitsyn¹, V. V. Shadrin^{1,2}, I. V. Osorgina^{1,2}, A. L. Svistkov^{1,2}

¹ Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

² Institute of Continuous Media Mechanics of the UB RAS, Ak. Koroleva St. 1, 614013, Perm
email: kislitsynvd@mail.ru

In the work, the physicommechanical properties of polyurethane materials with different composition formulations made using mortar and injection technologies are experimentally investigated. Several series of uniaxial mechanical tests of polyurethane samples were carried out, in which various deformation algorithms were used. The tests performed were both standard (up to the rupture of samples and with increasing amplitude), and unique (tests with nested cycles). Qualitatively analyzed data obtained during the experiments. It is shown that polyurethanes made using mortar technology are more flexible, less rigid, soften more strongly than samples made using injection technology. The elastic properties of the considered materials are modeled using the introduced elastic potential,

which is a generalization of the Gent elastic potential. As a result, theoretical curves of equilibrium (quasistatic) deformation of polyurethane materials are constructed. The data obtained as a result of mechanical tests are compared with theoretical calculations. The expediency of modeling the elastic behavior of polyurethane materials by generalizing the Gent potential is established.

Keywords: polyurethanes; equilibrium curve; elastic potential

Received 18.10.2019; accepted 30.11.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-17-25

1. Введение

Полиуретан – класс синтетических полимеров, молекулы которых содержат уретановые группы. Свойства этих полимеров существенно варьируются в зависимости от их молекулярной структуры. Однако отличительным свойством данной группы материалов является высокая эластичность и вязкость, именно поэтому полиуретаны относятся к группе эластомеров.

Строение полиуретановых эластомеров характеризуется наличием чередующихся блоков с низкой температурой стеклования, называемых гибкими блоками, и высокополярных, сравнительно жестких блоков.

Производство полиуретана – сложный и высокотехнологичный процесс. Наиболее распространены и исследованы такие методы изготовления полиуретановых изделий, как литье, экструзия и прессование.

Ни один из этих методов непригоден для изготовления тонкослойных пленочных изделий сложной формы. Для таких изделий наибольшее распространение получила технология формирования пленок, основанная на применении растворов линейных полимеров и реагирующих систем, одной из которых является система олигодиизоцианат – диамин, позволяющая получать полимер химически сшитого строения с повышенной прочностью и износостойкостью.

Подробно растворная технология получения таких пленок изучена и описана в работе [1] на примере фазового поведения реагирующей системы олигодиизоцианат-диамин-растворитель. Олигодиизоцианат использовали на основе полиэфиргликоля (сополимера тетрагидрофурана с пропиленоксидом) и 2,4-толуилендиизоцианата. В качестве диамина применяли 3,3-дихлор-4,4-диаминодифенилметан, растворитель – эфиры и кетоны.

2. Технологии изготовления полиуретановых образцов

Наиболее распространенным методом получения полиуретанов является литьевая технология. По данной технологии получают изделия следующим образом. Для этого используется форполимер, разогретый и отвакуумированный до полного

отсутствия влаги и воздуха в материале. Его смешивают с расплавом отвердителя и снова вакуумируют. После этого смесь форполимера с отвердителем заливают в форму и отверждают при температуре 110°C. Время отверждения зависит от состава отвердителя и может составлять от одного до шести часов. После отверждения образец несколько часов выдерживают в термощкафу при той же температуре и неделю при комнатной температуре в темноте для стабилизации и достижения максимальных механических характеристик. Изделия, полученные по этой технологии, являются конструкционными.

Для получения тонкостенных (0,2–0,3 мм) изделий сложной формы: трубок, оболочек и т. п., где смесь форполимера с отвердителем наносится на внешнюю поверхность формы, в ПГНИУ совместно с ИТХ УрО РАН разработана следующая технология.

Охлажденная ниже температуры кипения используемого растворителя смесь форполимера с отвердителем (смесь изготавливалась аналогично литьевой технологии) помещается в растворитель (ацетон, спирт, этилацетат и пр.) из расчета 30–70% смеси и 30–70% растворителя. Далее смесь выдерживается до гель-состояния и наносится на поверхность формы. После этого осуществляется выдержка в течение от 2 до 7 ч при комнатной температуре для испарения растворителя. При этом отверждение полиуретана не успевает произойти до полного испарения растворителя. Процесс повторяется от одного до трех раз для достижения нужной толщины пленки. Для завершения процесса изготовления изделия форма с нанесенными слоями отверждается в термощкафу.

Полученные по этой технологии тонкостенные оболочки являются более мягкими. Такие оболочки в момент выдержки на воздухе для испарения отвердителя оказываются очень чувствительными к влажности среды, поскольку медленное отверждение материала влагой из воздуха является альтернативным химическим процессом. Полиуретан, полученный по этой технологии, не является конструкционным материалом, но представляет интерес как покрытие на жестком изделии.

Таким образом, общими для литьевой и растворной технологий являются следующие особенности:

– предварительное вакуумирование нагретого форполимера;

- нагревание отвердителя перед смешиванием с форполимером;
- вакуумирование смеси форполимер-отвердитель после смешивания;
- отверждение смеси в предварительно разогретой форме при температуре от 100 до 110°C.

3. Материалы, использованные для изготовления образцов

Для исследования были изготовлены образцы полиуретана десяти модификаций. Это пять комплектов образцов по литьевой технологии и пять комплектов образцов по растворной технологии. Для изготовления всех образцов использовался один преполимер, который представлял собой форполимер уретановый ЭП SKU ПТ-74 от компании ООО «Производство «Эластопласт»» на основе простого полиэфира (производитель – Mitsubishi Chemical Corporation) и толуилдиизоцианата (производитель – Bayer International S.A.). В состав всех реакционных смесей входил один отвердитель МОКА (стандартный ароматический отвердитель диаминного типа для переработки преполимеров на основе простых и сложных полиэфиров). Рецептуры отличались количеством добавленного полифурита:

- № 2: преполимер + (МОКА + полифурит 29.3%);
- № 3: преполимер + (МОКА + полифурит 61.6%);
- № 4: преполимер + (МОКА + полифурит 78.9%);
- № 5: преполимер + готовая смесь отвердителя (МОКА 13.2% + полифурит 84.7% + воракол (лапромол) RA640 2.1%).

Лишь композиция 5 содержит дополнительный компонент лапромол, повышающий живучесть смеси.

Общая методика изготовления образцов: расчетное количество форполимера нагревается и вакуумируется до исчезновения пузырьков, затем к нему добавляется предварительно разогретый отвердитель, смесь интенсивно перемешивается и снова вакуумируется, после чего выливается в нагретую форму и отверждается в термошкафу. Соотношение форполимер-отвердитель и температурные режимы варьируются.

4. Оборудование, используемое для проведения испытаний

Испытания на одноосное растяжение до разрыва образца проводилась на четырехвекторном испытательном стенде Zwick/Roell, позволяющем задавать сложные траектории деформирования в двух взаимно перпендикулярных направлениях (независимо друг от друга). Его основные рабочие характеристики: максимальное усилие испытания 2.5 кН; погрешность измерения заданной нагрузки не более 0.25% для нагрузок от 10 Н и не более 1% для нагрузок от 2.5 Н; ход каждой траверсы до 400 мм (суммарный ход по каждой оси – 800 мм); ско-

рость перемещения от 0.001 до 15000 мм/мин. Помимо датчиков перемещения траверс и датчиков усилий машина оснащена видеоэкстензометром videoXtens, что позволяет исключить влияние таких искажающих факторов, как наличие галтелей образца и «выползание» образца из захватов и измерять истинную деформацию непосредственно в рабочей зоне образца. С его помощью можно бесконтактным образом измерять деформации в исследуемой области путём определения перемещений меток, нанесённых на образец. Это позволяет исключить влияние «выползания» образца из захватов и измерять истинную деформацию образца.

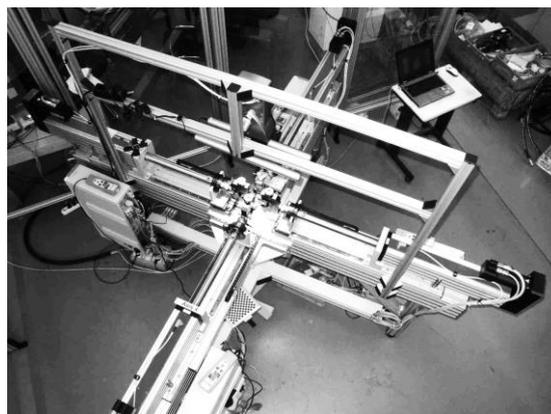


Рис. 1. Четырехвекторный испытательный стенд Zwick/Roell

Внешний вид машины представлен на рис. 1. Для двухосных испытаний изготавливаются образцы крестообразной формы. Для обеспечения равномерного поля напряжений в рабочей зоне крестообразного образца используется веерообразное закрепление тяг в захватах. Такое закрепление обеспечивает однородное поле напряжений и деформаций на большей части площади образца.

Испытания с нарастающей амплитудой и с вложенными циклами проводились на одноосной машине Testometric FS100kN СТ. Для этих испытаний использовался силоизмерительный датчик с точностью измерений вплоть до 0.001 Н.

5. Анализ результатов одноосных испытаний на растяжение до разрыва образца

В дальнейшем будем использовать следующие обозначения:

- λ – кратность удлинения вдоль оси приложения силы при одноосном нагружении образца;
- F – сила, приложенная к образцу;
- S_0 – начальное сечение образца.

Было получено, что диаграммы растяжения для различных испытаний для материала № 2 практически совпадают вплоть до кратности удлинения $\lambda = 4$; аналогичный результат был получен для материала № 3. Для материала № 5 диаграммы растяжения совпадают вплоть до кратности удлин-

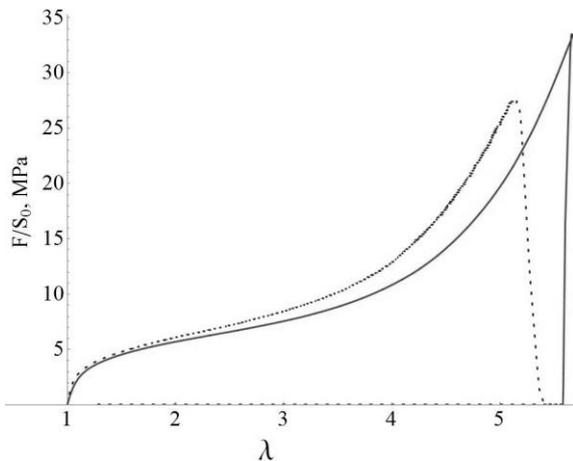


Рис. 2. Материал №2. Растворная технология (сплошная линия) и литьевая технология (пунктирная линия). Диаграммы растяжения

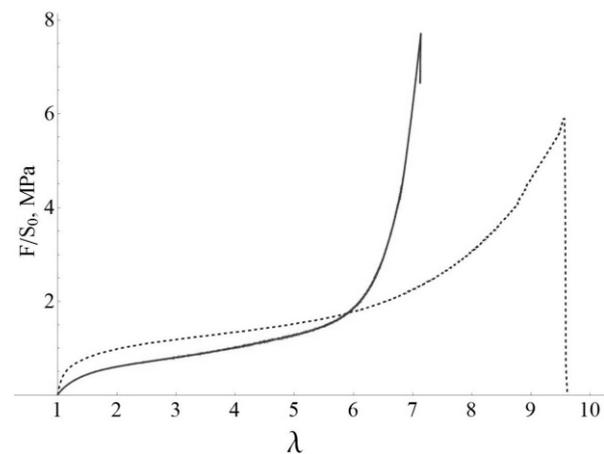


Рис. 3. Материал №5. Растворная технология (сплошная линия) и литьевая технология (пунктирная линия). Диаграммы растяжения

ния $\lambda = 5$; материал №4 обладает аналогичным механическим поведением. После указанных кратностей удлинения диаграммы растяжения начинают расходиться. Данный факт можно объяснить двумя факторами различной природы:

1. Образцы полиуретановых материалов начинают выскользывать из захватов оборудования в ходе растяжения. Закреплять каждый образец для испытания необходимо вручную, в связи с чем степень «выползания» каждого образца из захватов оказывается различной.

2. Материал в образцах не может быть однородным по всему объему. Существуют небольшие отличия в концентрациях компонентов в результате смешения до начала химической реакции, небольшие отклонения в температурных режимах на стадии отверждения и т.д. На стадии изготовления образцов это приведет к неоднородным механическим характеристикам материала.

3. В материале имеются дефекты. Их количество и размеры отличаются в разных образцах. Поэтому возможно отличие в механическом поведении образцов при больших удлинениях.

На рис. 2–3 представлены диаграммы растяжения, имеющие наименьшее суммарное среднеквадратичное отклонение от остальных кривых для скорости $\dot{\lambda} = 1 \text{ мин}^{-1}$ для соответствующего материала и технологии изготовления.

Из диаграмм растяжения получено, что все материалы, созданные с применением литьевой технологии, являются более жесткими, чем аналогичные материалы, созданные с применением растворной технологии. Только материал № 5, изготовленный по растворной технологии, является немного более жестким вплоть до кратности удлинения $\lambda = 6$. Отдельно стоит отметить, что материал № 5, изготовленный по растворной технологии, гораздо более высокоэластичный, чем аналогичный материал, изготовленный по литьевой технологии.

6. Анализ результатов одноосных испытаний с нарастающей амплитудой

Стандартным испытанием материалов в условиях одноосного нагружения является растяжение до разрыва с постоянной скоростью. Но такие эксперименты малоинформативны. Поэтому приходится проводить множество экспериментов с разными скоростями деформирования, разными уровнями деформации и разными действующими силами. Гораздо больше информации позволяют получить эксперименты, в которых один вид деформирования сменяется другим. Поэтому одним из ключевых экспериментов является циклическое деформирование материала с остановками при смене направления движения захватов.

При этом образец сначала растягивают до заданной деформации, выдерживают при этой деформации заданное время, сжимают до исходного ненагруженного состояния, выдерживают заданное время, затем циклически деформируют с выдержкой во времени на каждой ступени деформации при растяжении и сжатии, при этом деформация на каждом цикле растяжения задается большей на фиксированный шаг, чем на предыдущем цикле, а деформация на каждом цикле разгрузки задается прежней (табл. 1). Кривые циклического деформирования с нарастающей амплитудой представлены на рис. 4–7.

На рис. 4 при разгрузке до 0 Н и выдержке по времени существуют промежуточные точки между разгрузкой и остаточной деформацией при следующем растяжении. Эти точки появились из-за особенностей полиуретанового материала и машины Testometric, имеющей два режима: «Растяжение» и «Сжатие». В режиме «Растяжения» машина не допускает нагрузку меньше -2 Н , так как при данной нагрузке она отключается.

Таблица 1. Алгоритм деформирования образца в одноосном испытании с нарастающей амплитудой

Процесс деформирования	Предельное значение кратности удлинения	Скорость деформирования $\dot{\lambda}$, мин ⁻¹	Продолжительность остановки захватов в конце цикла, мин
1. Нагружение	max $\lambda = 1.5$	0.25	10
Разгрузка	min $\lambda = 1$	-0.25	10
2. Нагружение	max $\lambda = 2$	0.25	10
Разгрузка	min $\lambda = 1$	-0.25	10
3. Нагружение	max $\lambda = 2.5$	0.25	10
Разгрузка	min $\lambda = 1$	-0.25	10
4. Нагружение	max $\lambda = 3$	0.25	10
Разгрузка	min $\lambda = 1$	-0.25	10
5. Нагружение	max $\lambda = 3.5$	0.25	10
Разгрузка	min $\lambda = 1$	-0.25	10
6. Нагружение	max $\lambda = 4$	0.25	10
Разгрузка	min $\lambda = 1$	-0.25	Завершение эксперимента

Чтобы избежать выключения машины и определить остаточную деформацию, используется искусственный приём. При достижении нагрузки -0.05 Н производится выдержка в течение 17 мин, после чего нагрузка уменьшается до -0.05 Н и идет выдержка еще 3 мин.

Из рис. 4–7 видно, что все материалы, изготовленные по литьевой технологии, являются более жесткими, чем аналогичные материалы, изготовленные по растворной технологии. Такой же результат был получен при испытаниях на растяжение до разрыва образца полиуретанового материала.

Также во всех материалах, изготовленных по растворной технологии, релаксация напряжений происходит на меньшую величину, чем для аналогичных материалов, изготовленных по литьевой технологии. Отметим, что для материалов № 4 и № 5 разница в релаксации напряжений весьма значительна. В образце материала № 2 остаточные деформации практически совпадают для обеих технологий изготовления, а для образца материала № 3 остаточные деформации, изготовленного по растворной технологии немного больше остаточ-

ных деформаций образца, изготовленного по литьевой технологии. Однако у материала № 4 остаточные деформации образца, изготовленного по литьевой технологии, более чем в два раза превосходят остаточные деформации образцов, изготовленных по растворной технологии. У материала № 5 остаточные деформации образца, изготовленного по литьевой технологии, более чем в два раза превосходят остаточные деформации образцов, изготовленных по литьевой технологии.

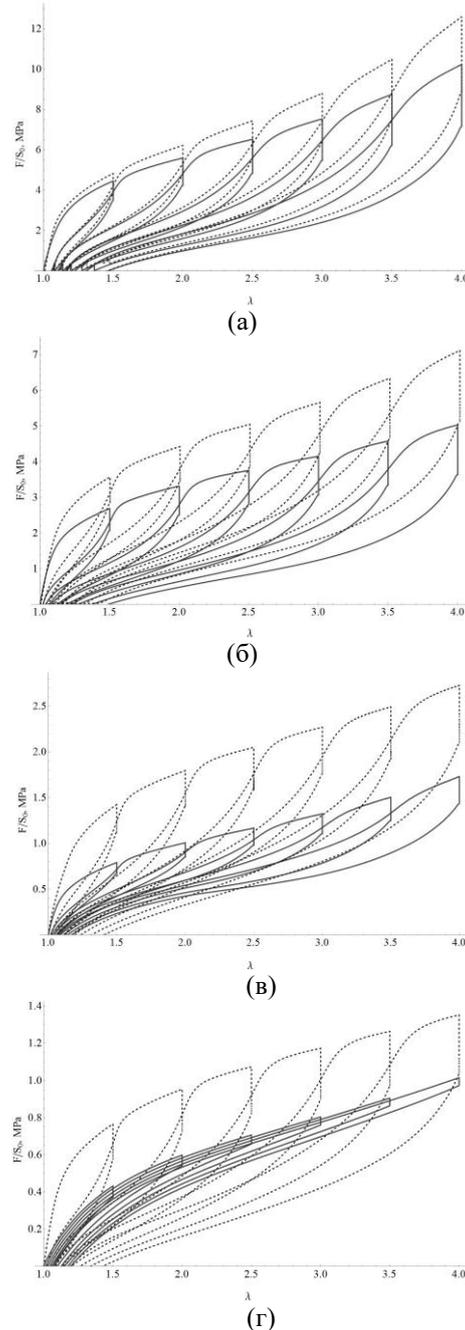


Рис. 4. Кривые циклического деформирования с нарастающей амплитудой материала, изготовленного по растворной (сплошная линия) и литьевой (пунктирная линия) технологиям: а – № 2; б – № 3; в – № 4; г – № 5

7. Анализ результатов одноосных испытаний с вложенными циклами

Данная методика исследования позволяет получить информацию о размягчении материала, остаточных деформациях, вязкоупругом поведении при разных скоростях движения захватов и о равновесных состояниях в рамках одного эксперимента.

В рамках этого испытания образец сначала растягивают до максимальной заданной деформации, выдерживают при этой деформации заданное время, сжимают до исходного ненагруженного состояния, выдерживают заданное время, затем циклически деформируют с выдержкой во времени на каждой ступени деформации при растяжении и сжатии, при этом деформация на каждом цикле растяжения задается меньшей, чем на предыдущем цикле, а деформация на каждом цикле разгрузки задается большей, чем на предыдущем цикле (табл. 2).

Таблица 2. Алгоритм деформирования образца в одноосном испытании с вложенными циклами

Процесс деформирования	Предельное значение кратности удлинения	Скорость деформирования $\dot{\lambda}$, мин ⁻¹	Продолжительность остановки захватов в конце цикла, мин
1. Нагружение	max $\lambda = 2$	1	20
Разгрузка	min $\lambda = 1$	-1	20
2. Нагружение	max $\lambda = 2$	1	10
Разгрузка	min $\lambda = 1.2$	-0.5	10
3. Нагружение	max $\lambda = 1.9$	0.5	10
Разгрузка	min $\lambda = 1.3$	-0.2	10
4. Нагружение	max $\lambda = 1.8$	0.2	10
Разгрузка	min $\lambda = 1.4$	-0.05	10
5. Нагружение	max $\lambda = 1.7$	0.05	10
Разгрузка	min $\lambda = 1.5$	-0.05	10
6. Нагружение	max $\lambda = 1.6$	0.05	10
Разгрузка	min $\lambda = 1$	-0.05	Завершение эксперимента

Такой подход позволяет получить больше информации о свойствах материала при испытании

одного образца, а также позволяет построить равновесные кривые растяжения, диссипативных потерь, размягчения материала после каждого цикла растяжения-сжатия, кривых релаксации и восстановления структуры материала при разных деформациях.

Данный вид испытаний дает возможность исключить разброс данных из-за погрешности изготовления и захвата разных образцов, а также экономить материал и время испытания.

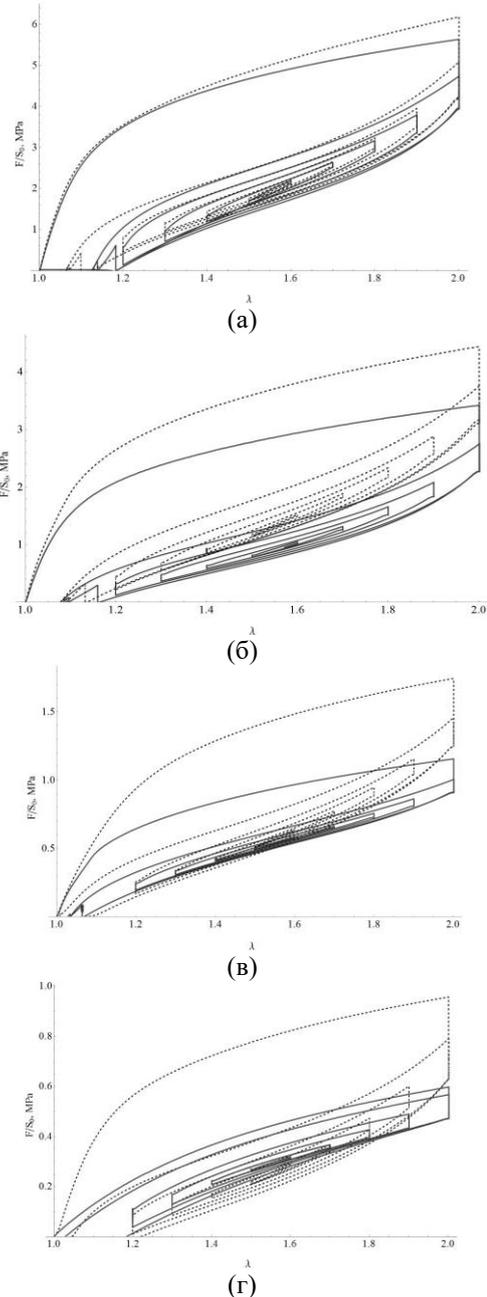


Рис. 5. Кривые циклического деформирования с вложенными циклами материала, изготовленного по растворной (сплошная линия) и литейной (пунктирная линия) технологиям: а – № 2; б – № 3; в – № 4; г – № 5

Отличительные особенности данного способа – остановка и выдержка по времени на каждом этапе

деформации (это позволяет снять временную характеристику материала); построение равновесной кривой; растяжение на каждом цикле с разной скоростью.

При каждом заданном уровне деформации образец подвергается временной выдержке. Количество циклов в общем случае не устанавливается.

Кривые циклического деформирования с вложенными циклами представлены на рис. 5. На рис. 5, а,б при разгрузке до 0 Н и выдержке по времени существуют промежуточные точки по аналогичным причинам, описанным ранее для испытаний с нарастающей амплитудой.

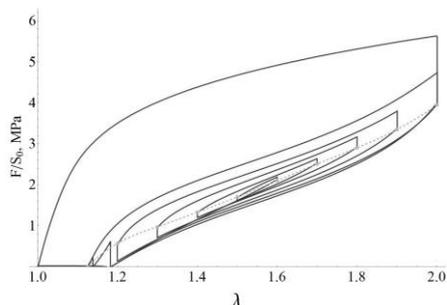


Рис. 6. Кривая циклического деформирования с вложенными циклами материала № 2, изготовленного по растворной технологии (сплошная линия) и соответствующая равновесная кривая (пунктирная линия)

На рис. 6 построена равновесная кривая, соответствующая кривой очень медленного растяжения образца, когда в нем реализованы все вязкоупругие процессы и связанная с ними релаксация напряжений отсутствует. Для построения точек равновесной кривой нужно взять точки восстановленной структуры материала после его выдержки по времени при разгрузке на каждом цикле и точки окончания релаксации напряжений после выдержки по времени при растяжении образца. Первая точка равновесной кривой на оси абсцисс берется в месте ее пересечения с графиком разгрузки на первом цикле испытаний.

Из результатов испытаний следует, что все материалы, изготовленные по литьевой технологии, являются более жесткими, чем аналогичные материалы, изготовленные по растворной технологии. Такой же результат был получен при испытаниях на растяжение до разрыва образца полиуретанового материала. Выводы относительно релаксации напряжений для испытаний с нарастающей амплитудой для всех материалов, справедливы и в данном виде испытаний с вложенными циклами.

Рассчитаем далее накопленную материалом энергию при данном виде испытаний. Величина накопленной энергии равна площади под графиком равновесной кривой.

Исходя из данных, представленных в табл. 3, видно, что в материалах № 2, 3 и 4, изготовленных по литьевой технологии, накопленная энергия

больше, чем в аналогичном материале, изготовленном по растворной технологии. В материале № 5 накопленная энергия практически равна для обеих технологий изготовления.

Таблица 3. Накопленная материалом энергия

Материал	Технология изготовления	Накопленная энергия
№2	Растворная	1.735 МПа
	Литьевая	1.859 МПа
№3	Растворная	0.898 МПа
	Литьевая	1.277 МПа
№4	Растворная	0.479 МПа
	Литьевая	0.558 МПа
№5	Растворная	0.253 МПа
	Литьевая	0.250 МПа

Данный вид испытаний также позволяет получить информацию о размягчении материала, которое характеризуется площадью между двумя верхними ветвями кривой циклического деформирования с вложенными циклами. Материалы № 2 и 3 размягчаются практически одинаково для обеих технологий изготовления. Однако материал № 4, изготовленный по литьевой технологии, размягчается значительно сильнее аналогичного материала, изготовленного по растворной технологии.

8. Анализ упругих свойств полиуретановых материалов

Для анализа полученных экспериментальных данных был использован следующий вид потенциала для описания объемной плотности упругой энергии деформации:

$$\omega = \alpha C \ln(I_1) + CI_* \ln(1 - I_1 / I_*) + const,$$

где α , C , I_* – материалыные постоянные, $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ – инвариант деформации.

Представленный потенциал является комбинацией двух частей: для описания начального участка нагружения (первое слагаемое) и резкого роста напряжений с увеличением деформацией (второе слагаемое). Вторая компонента – это вариация потенциала Джента, где константа I_* является предельным значением I_1 и характеризует предельное растяжение сетки, поэтому значение константы будет зависеть от степени удлинения образца.

В случае одноосного растяжения выражение для напряжения σ_1 для обобщения потенциала Джента принимает вид

$$\sigma_1 = 2C \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(\frac{\alpha \lambda}{\lambda^3 + 2} - \frac{I_* \lambda}{\lambda^3 + 2 - I_* \lambda} \right).$$

Зададим константу α постоянной для всех материалов, чтобы исключить взаимное влияние α и

С друг на друга. Считая, что $\alpha = 5$, вычислим значения констант C и I_* для различных полиуретановых материалов (табл. 4).

Таблица 4. Значения констант для обобщения потенциала Джента для разных материалов

Материал	Технология изготовления	C	I_*
№2	Растворная	0.312	6.278
	Литьевая	0.184	5.850
№3	Растворная	0.276	6.299
	Литьевая	0.076	6.420
№4	Растворная	0.123	5.686
	Литьевая	0.076	8.384
№5	Растворная	0.032	5.853
	Литьевая	0.044	8.870

Из этих результатов видно, что константа C для материалов № 4 и № 5 незначительно различается между растворной и литьевой технологиями. Для материалов № 2 и № 3 причины различия между полученными константами C для растворной и литьевой технологий изготовления образцов следует выявлять дополнительно. В связи с этим в дальнейшем необходимо будет проанализировать другие испытания со вложенными циклами для материалов № 2 и № 3, например, при максимальных кратностях удлинений больше 2.

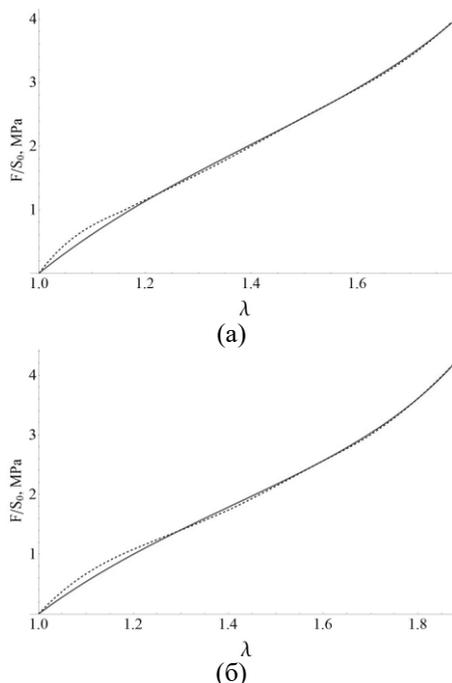


Рис. 7. Равновесная кривая материала № 2, изготовленного по: а – растворной, б – литьевой технологии (пунктирная линия) и соответствующая теоретическая кривая обобщения потенциала Джента (сплошная линия)

Тем не менее для данного потенциала можно считать, что константа C в большей степени определяется самим полиуретановым материалом (его рецептурой изготовления), а константа I_* характеризует способность клубков гибких полимерных цепей разворачиваться.

Суммарное среднее квадратичное отклонение теоретических кривых, построенных при помощи обобщения потенциала Джента, от ранее полученных соответствующих равновесных кривых составляет 0.207 Мпа, на основе чего можно сказать, что обобщение потенциала Джента с достаточной точностью совпадает с данными эксперимента.

Из рис. 7–8 следует, что обобщенный потенциал Джента дает точное приближение к равновесной. Существенным преимуществом обобщения потенциала Джента является то, что данный потенциал зависит лишь от двух констант.

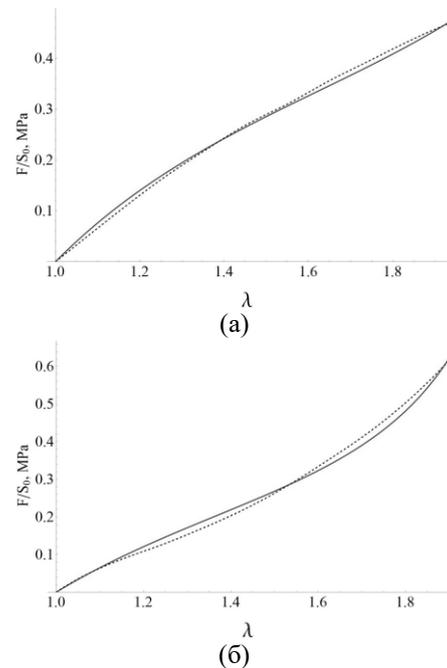


Рис. 8. Равновесная кривая материала № 5, изготовленного по: а – растворной, б – литьевой технологии (пунктирная линия) и соответствующая теоретическая кривая обобщения потенциала Джента (сплошная линия)

9. Заключение

В данной работе были проанализированы результаты нескольких видов одноосных испытаний с различными полиуретановыми материалами. Было установлено, что полиуретановые материалы, изготовленные по растворной технологии, являются менее жесткими, чем аналогичные материалы, созданные с применением литьевой технологии.

Тем не менее определить другие механические свойства сразу для всех рассмотренных материа-

лов для какой-либо технологии изготовления невозможно. Следовательно, полиуретаны представляют собой материалы со сложным механическим поведением, и для них трудно получить количественную связь между рецептурой, технологией изготовления и механическими свойствами.

Было также установлено получено, что для описания равновесной кривой деформирования наиболее целесообразно использовать обобщенный потенциал Джента, так как данный упругий потенциал зависит от малого количества констант, которым возможно присвоить конкретный физический смысл.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-19-00574.

Список литературы

1. Романова В. А. Фазовое поведение реагирующей системы при синтезе пленок полиуретана в условиях удаления растворителя: дис. к.х.н. Пермь: Перм. гос. ун.-т., 2005.
2. Свисткова Л. А. Физика полимеров: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. 92 с.
3. Осоргина И. В., Бегисhev В. П., Кондюрин А. В., Плаксин С. А. Маммапротезы с полиуретановой оболочкой // Пластические массы. 1997. № 8. С. 26–29.
4. Свистков А. Л., Шадрин В. В. Патент РФ № 2013149316/28, 07.11.2013. Способ одноосного циклического испытания материала // Патент России № 2549841. 2015. Бюл. № 13.

References

1. Romanova V. A. *Fazovoe povedenie reagiruyushchej sistemy pri sinteze plenok poliuretana v usloviyah udaleniya rastvoritelya* (Phase behavior of the reacting system in the synthesis of polyurethane films under solvent removal conditions). Abstr. of PhD Thesis, Perm: Perm State University, 2005, (In Russian).
2. Svistkova L. A. *Fizika polimerov* (Polymer Physics): Tutorial. Perm: Perm State Technical University, 2003, 92 p.
3. Osorgina I. V., Begishev V. P., Kondyurin A. V., Plaksin S. A. *Mammoprotezy s poliuretanovoj obolochkoj* (Polyurethane-covered mammaprotheses). *Plasticheskie massy*, 1997, No. 8, pp. 26–29.
4. Svistkov A. L., Shadrin V. V. Patent № 2013149316/28, 07.11.2013. *Sposob odnoosnogo ciklicheskogo ispytaniya materiala* (Method for uniaxial cyclic testing of material). Russian patent № 2549841. 2015. vol. № 13.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кислицын В. Д., Шадрин В. В., Осоргина И. В., Свистков А. Л. Анализ механических свойств полиуретановых материалов, изготовленных по растворной и литьевой технологиям // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 1. С. 17–25. doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-17-25

Please cite this article in English as:

Kislitsyn V. D., Shadrin V. V., Osorgina I. V., Svistkov A. L. Analysis of the mechanical properties of polyurethane materials manufactured by mortar and injection technology. Bulletin of Perm University. Physics, 2020, no. 1, pp. 17–25. doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-17-25