

УДК 621.762

ОСНОВЫ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ЭЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Е.Е. ПЕТЮШИК, О.П. РЕУТ, Д.В. МАКАРЧУК

(Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики Министерства образования Республики Беларусь, Минск)

Ряд технологических процессов прессования уплотняемых материалов основан на использовании эластичного деформирующего инструмента (оболочек). На основе анализа свойств современных эластомеров в сопоставлении с требованиями, предъявляемыми к материалу оболочек, показаны преимущества использования в качестве материала эластичных оболочек литых полиуретанов, рассмотрены условия применимости известных методов расчета эластичного деформирующего инструмента.

Выбор материала эластичного инструмента для прессования уплотняемых материалов осуществляют на основе оценки соответствия его физико-механических свойств комплексу требований, предъявляемых к материалу оболочки при реализации конкретного способа прессования. При изостатическом (радиальном) прессовании оболочка выполняет многофункциональную роль, которой и определены эти требования:

- способность принимать и сохранять форму, соответствующую форме изделия;
- высокая эластичность и упругость, т.е. способность многократно выдерживать значительные деформации и способность возвращаться к первоначальной форме и размерам после снятия давления;
- достаточная твердость для предотвращения проникновения материала оболочки между частицами уплотняемого материала, что может служить причиной загрязнения прессовки и ее разрушения;
- химическая пассивность по отношению к уплотняемым материалам, смазкам (или жидкостям);
- отсутствие склеивания или схватывания с уплотняемым материалом, что обеспечивает легкое извлечение брикета из оболочки;
- высокая износостойкость, что позволяет изготавливать большое количество изделий без замены оболочки, прочность на раздир;
- поведение материала оболочки под давлением должно быть близким к поведению жидкости (то есть коэффициент Пуассона $\bar{\mu} \rightarrow 0,5$), что важно для равномерной передачи давления на уплотняемый материал и имеет преимущественное значение при изготовлении изделий сложной формы;
- высокая прочность на разрыв, особенно, если конструкция формы для прессования предусматривает возникновение в оболочке растягивающих напряжений;
- невысокая стоимость;
- хорошие технологические свойства.

Наиболее полно этим требованиям отвечают эластомеры. Сравнение их свойств затруднено возможностью модификации [1], поэтому ограничимся сравнением стандартных свойств и основных характеристик типичных эластомеров (таблица).

Эластомеры демонстрируют линейную зависимость между напряжением и деформацией в небольших пределах начальных деформаций (рис. 1, участок I). Величина этой деформации составляет для уретановых эластомеров 3...5 %, для резин ~10...20 % [2]. Участок II – зона высокоэластичности; III – предшествующий пластическому течению.

Высокоэластический модуль эластомера, определяемый комплексом релаксационных свойств, состоит из двух частей: равновесной и неравновесной, соответственно определяющих доли высокоэластических сил и внутреннего трения в сопротивлении эластомера деформированию. Упругая энергетическая составляющая деформации имеет большое значение при расчете энергетических параметров процессов прессования [3] и пренебрегать ею нельзя. Так, при давлениях ~500 МПа в условиях всестороннего сжатия изменение объема, в частности полиуретана, составляет ~10 % [3], и это в расчетах параметров процессов прессования нужно принимать во внимание.

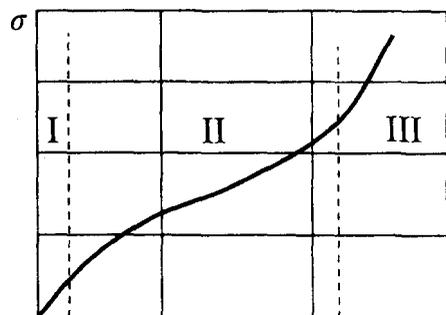


Рис. 1. Типичная диаграмма деформирования эластичного материала при простом растяжении

Диапазон изменения основных свойств некоторых эластомеров

Наименование материала «Изготовитель»	Твердость, Шкала Шора А-Д	Сопротивление разрыву, МПа	Сопротивление раздиру, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Остаточная деформация при сжатии (при 70 °С), %	Относительное истирание, кг/кВт·ч	Статический модуль сдвига, МПа	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Натуральный каучук	A 50-55	10...38	10	350...150	30...45 (24 ч)	0,24...0,3	2,7*	7,9*	0,46
Силиконовый каучук	A 42	0,35...0,8	1,5...2	360	—	0,35...0,6	—	3,0...15	0,465...0,485
Хлоропеновый каучук	A 50-60	14...26,5	6,0...9,0	600...750	25 (24 ч)	0,29...0,35	—		
Бутадиен-стирольный каучук	A 65-72	14...28	6,6...9,5	500...700	25...30 (24 ч)	0,2...0,32	1,0...1,3		
Поливинилхлорид	A 40-85	13,5...30,0	2...3,5	350...150	30...50 (24 ч)	0,4...0,7	—	300,0...400,0	
Полиуретаны: Адипрен	A 78-96	20,0...35,0	10...30	800...450	27...54 (22 ч)	0,03...0,25	2,8...7,5	8,0...400,0	0,48...0,49
Кастомер «Изоцианат Продактс Инкомпани»	A 88-Д 60	40,0...42,0	10...26	420...300	30...40 (22 ч)				
Конатан «Канат Инкомпани»	A 55-96	29,5...43,5	15...34	650...440	5...45 (22 ч)				
Цианопрен «Американ Цианамид Компани»	A 82-Д 78	35,8...67,0	12...30	650...430	20...30 (22 ч)				
Формрез «Уитко Кемикл Компани»	A 77-Д 80	40,3...70,3	14...28	770...440	—				
Малтратан «Мобей Кемикл Компани»	A 70-Д 55	28,1...56,2	10...25	650...380	—				
Вибратан «Юнайтед Раббер Компани»	A 65-98	28,1...45,7	8...36	600...400	10...35 (22 ч)				

* – расчетные значения.

Оценить диапазон распределения значений модуля Юнга для различных материалов позволяет рис. 2 [1]. В частности, основной диапазон значений модуля Юнга для полиуретанов занимает промежуточное положение между значениями для каучуков и пластмасс. В общих областях значений модуля Юнга обычно предпочтение отдают полиуретанам вследствие их специфических свойств [2].

Инженерные расчеты требуют определения двух независимых показателей упругости эластомеров: модулей сдвига \bar{G} и объемного сжатия \bar{K}_v . Модуль сдвига \bar{G} для производственных резин составляет 0,35...2 МПа [4], для полиуретанов – 2,8...7,5 МПа.

Твердость эластомеров может изменяться в широких пределах. Так, диапазон твердости полиуретанов составляет по шкале Шора от 60 А до 80 Д (верхний предел); диапазон твердости резин – 46...80 по Шору А [1]. В процессах прессования целесообразно использование (при условии сохранения высокой эластичности и упругости) материалов с более высокой твердостью с целью предотвращения проникновения материала оболочки между частицами уплотняемого материала.

Сопротивление износу связано с сопротивлением раздиру. При соизмеримой твердости (малой и средней) полиуретаны по сравнению с другими эластомерами обладают более высоким сопротивлением раздиру. С увеличением твердости сопротивление раздиру растет [1].

Коэффициент Пуассона $\bar{\mu}$ для эластомеров не является величиной постоянной. Экспериментальные определения $\bar{\mu}$ в условиях сжатия при сухом трении дали для производственных резин значения в пределах 0,465...0,485 [4], а для полиуретанов 0,48...0,49 [4].

Анализ свойств эластомеров показал, что полиуретаны в широком диапазоне твердости превосходят резины по ряду характеристик: показателям износостойкости, относительного удлинения, сопротивлению разрыву, раздиру и истиранию, хотя уступают по остаточной деформации и эластичности; имеют более высокий модуль упругости, обеспечивая возможность уменьшения материалоемкости оболочек для прессования, что экономически и конструктивно выгодно. Кроме того, полиуретаны характеризуются высокой стойкостью к действию масел [1, 2], а также имеют хорошие адгезионные свойства к металлам, что важно для изготовления армированных оболочек.

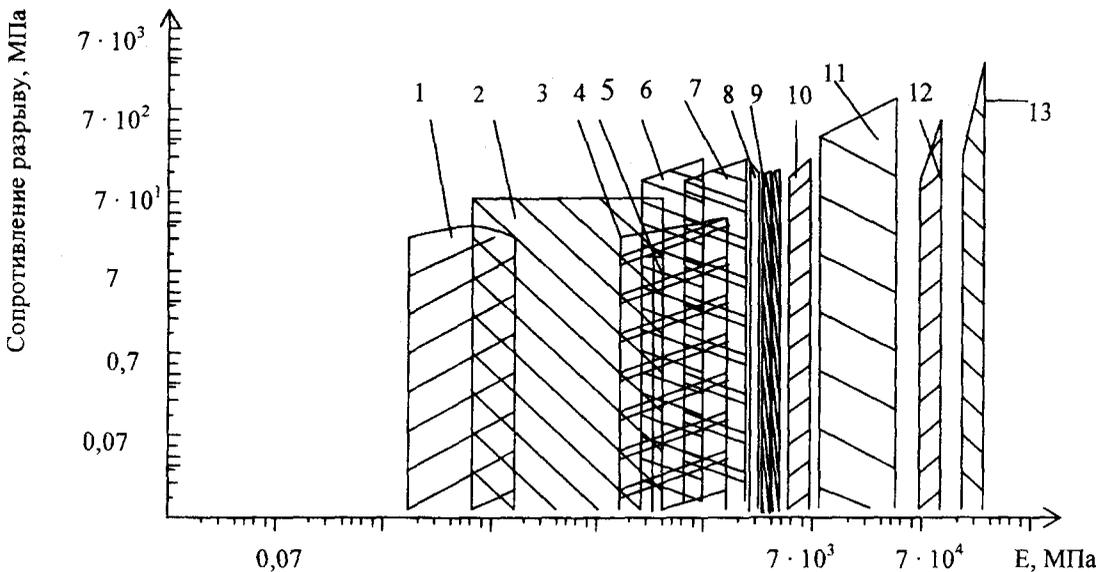


Рис. 2. Диапазон изменения модуля Юнга в зависимости от сопротивления разрыву для материалов: 1 – резина; 2 – сшитые полиуретаны; 3 – полиэтилен; 4 – тефлон (ПТФЭ); 5 – линейные полиуретаны; 6 – полиамид; 7 – поликарбонат; 8 – акриловая смола; 9 – жесткий поливинилхлорид; 10 – вулканизированные волокна; 11 – эпоксидные смолы и полиэфир, наполненные стекловолокном; 12 – алюминиевые сплавы; 13 – сталь

При рассмотрении свойств полиуретанов предполагалось, что данные о том или ином свойстве верны для всех разновидностей полиуретанов вне зависимости от технологических особенностей их изготовления: литевых, вальцуемых и термопластичных. Вместе с тем, отметим следующее. Наиболее высокие физико-механические свойства характерны для литевых полиуретанов, в том числе минимальная остаточная деформация при сжатии, что особенно важно при объемном сжатии. Термопласты превосходят вальцуемые материалы, особенно по сопротивлению раздиру и истиранию. По химической стойкости литевые и термопластичные полиуретаны несколько выше вальцуемых. Исходя из этого, очевидна целесообразность использования в качестве материала для эластичного деформирующего инструмента литевых полиуретанов, которые, помимо прочего, отличаются высокой технологичностью в изготовлении, что в значительной степени компенсирует более высокую стоимость полиуретанов вообще по сравнению с другими эластомерами и обеспечивает возможность получения точных размеров прессформ. Анализ свойств конкретных марок полиуретанов показал, что предпочтительным для эластичных оболочек является полиуретан марок «Адипрен», «Конатан» и «Вибратан».

Широкий диапазон изменения основных характеристик эластомеров в зависимости от степени деформации и уровня нагружения затрудняет использование классической теории упругости при расчетах напряженно-деформированного состояния этого класса материалов. Рассмотрим основные допущения, используемые в современных методах расчета изделий из высокоэластичного материала [5], и влияние характера деформации эластичной оболочки на методы ее расчета.

Упругая аналогия. Принимается, что подлежащие определению функции напряжений $\bar{\sigma}_{ij} = \bar{\sigma}_{ij}(x, t)$ и перемещений $\bar{u}_i = \bar{u}_i(x, t)$ можно искать, разделив переменные на временную и координатную части, если граничные условия не зависят от времени. Тогда отдельно решают упругую задачу (принимая, что $\bar{\sigma}(0) = 1$ и $\bar{u}(0) = 1$ для $t = 0$), определяя $\bar{\sigma}_{ij}(x)$ и $\bar{u}_i(x)$, и затем задачу по нахождению $\bar{\sigma}(t)$ и $\bar{u}(t)$.

Ввиду математических сложностей – следствия геометрической, физической и часто конструкционной нелинейности – используют ряд упрощающих гипотез, справедливых в отдельных областях применения.

При *малых деформациях* ($1 + \bar{\epsilon}_{ij} \approx 1$) используют закон Гука. Модуль сдвига \bar{G} высокоэластичных материалов в 10^3 раз меньше модуля объемного сжатия \bar{K}_V [6]. Поэтому обычно принимают, что материал несжимаем. Исключение – когда высокоэластичный материал работает на объемное сжатие, как в случае прессования уплотняемых материалов. В этом случае пренебрежение сжимаемостью приведет к значительным погрешностям. Для резин область малых деформаций $\bar{\epsilon} \leq 0,15$, для полиуретанов – $\bar{\epsilon} \leq 0,03 \dots 0,05$.

При *средних деформациях* ($\bar{\epsilon} \leq 0,4$) наблюдаются малые приращения напряжений и деформаций, наложенных на уже нагруженное тело. Это служит основой для построения шаговой процедуры решения задачи, поскольку сохраняется справедливость использования аппарата малых деформаций внутри каждого шага.

В случае *больших деформаций* ($\bar{\epsilon}_{ij} > 0,4$) физические соотношения обычно выражают с помощью упругого потенциала W (удельная потенциальная энергия деформации) через инварианты тензора деформаций. Ввиду сложности обычно удается получить лишь приближенные решения задач [6]. Наибольшее количество аналитических решений практических задач получено методом Ритца [7]. Основаны они на вариационных постановках краевых задач. Кроме того, для получения численных решений достаточно часто используется метод конечных элементов [8]. Весьма полезно представление о том, что любое нагруженное состояние при малых деформациях можно представить как сумму двух решений:

- 1) деформирование несжимаемого материала;
- 2) изменение объема [7].

В силу сжимаемости реального материала оболочек при высоких давлениях возрастают энергозатраты на изменение его объема. Связь между напряжениями и деформациями практически во всех случаях не является линейной, что определяет в общем случае постановку задачи по расчету напряженно-деформированного состояния эластичной оболочки как физически нелинейной [9]. Однако, принимая во внимание обстоятельство, что деформация эластичных материалов при прессовании уплотняемых материалов обычно не превышает 30 %, т.е. находится в области средних деформаций, можно применить уравнения линейной теории упругости с переменными значениями модуля сдвига и объемного сжатия, полученными экспериментально, в виде зависимости от величины гидростатического давления [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Райт П., Каммин А. Полиуретановые эластомеры. – Л.: Химия, 1973. – 236 с.
2. Липатов Ю.С. Керча Ю.Ю., Сергеева Л.М. Структура и свойства полиуретанов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 279 с.
3. Петюшик Е.Е., Макаручук Д.В., Липлянин П.К. Определение характеристик сжимаемости материалов сред, передающих давление при изостатическом прессовании / Труды БГТУ. Вып. IV. Сер. III. – Мн., 1998. – С. 117 – 124.
4. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. – М.: Химия, 1978. – 544 с.
5. Лавендел Э.Э., Лейканд М.А., Львов С.В. Экспериментальное исследование изменения объема резины при сжатии и растяжении // Вопросы динамики и прочности. – Рига, 1981. – Вып. 38. – С. 49 – 53.
6. Аскадский А.А. Деформация полимеров. – М.: Химия, 1973. – 448 с.
7. Лавендел Э.Э. Прикладные методы расчета изделий из высокоэластичных материалов. – Рига: Зинатне, 1980. – 230 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 218 с.
9. Петюшик Е.Е., Загайгора И.Г. Напряженно-деформированное состояние эластичной двухслойной оболочки в процессах прессования // Весці НАН Б. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1998. – № 3. – С. 23 – 27.
10. Напряжения и деформации в порошковом теле и деформирующем инструменте при радиальном прессовании / О.П. Реут, Е.Е. Петюшик, Д.В. Макаручук, А.Ф. Смалюк // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. – С. 199 – 204.