

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЭЛАСТИЧНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Семенов И.Е., Брайко Д.А., Резнюк К.Д., Акперов К.И.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва*

Ключевые слова: осадка, Муни-Ривлин, SKU-ПФЛ-100, деформирующая сила, контактное напряжение, армированный полиуретан, арамидное волокно, математическое моделирование.

Аннотация. Эластичные материалы находят широкое применение в качестве деформирующего инструмента при обработке материалов давлением. В данной статье приведены результаты осадки цилиндрических образцов из полиуретана «SKU-ПФЛ-100» и такого же полиуретана, но армированного арамидным волокном. Армирование полиуретана позволило увеличить деформирующую силу, расширяя технологические возможности инструмента. При обработке результатов эксперимента учтено трение на контактных поверхностях образцов. На основе результатов эксперимента рассчитаны параметры двухпараметрической модели Муни-Ривлина для полиуретана «SKU-ПФЛ-100». Последующее математическое моделирование эксперимента показало адекватность модели Муни-Ривлина.

MECHANICAL CHARACTERISTIC INVESTIGATION OF CYLINDRICAL SAMPLES MADE OF ELASTIC COMPOSITE MATERIAL

Semenov I.E., Brayko D.A., Reznjuk K.D., Akperov K.I.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: upsetting, Mooney-Rivlin, SKU-PFL-100, deforming force, contact stress, reinforced polyurethane, aramid fiber, mathematical modeling.

Abstract. Elastic materials are widely used as a deforming tool in material processing by pressure. The research presents the experiment results of upsetting of cylindrical samples made of polyurethane "SKU-PFL-100" and the same polyurethane, but reinforced with aramid fiber. Polyurethane reinforcement made it possible to increase the deforming force, expanding the technological capabilities of the tool. The friction on the contact surfaces of the samples was taken into account when experiment result processing. Based on the experiment results, the parameters of the two-parameter Mooney-Rivlin model for polyurethane "SKU-PFL-100" were calculated. Subsequent mathematical modeling of the experiment showed the adequacy of the Mooney-Rivlin model.

Введение

Широкое применение полиуретановых эластомеров связано с их уникальными механическими свойствами: способности к большим обратимым деформациям при сравнительно небольших значениях модуля упругости, а также способности поглощать и рассеивать механическую энергию в широком температурном интервале. Именно эти особенности механических свойств определяют огромное значение эластомеров для современного машиностроения и других отраслей техники [1, 2].

Однако жесткость полиуретановых эластомеров ограничена, что влияет на технологические возможности, использующего их инструмента. Одним из

способов решения этой проблемы является армирование существующих эластомеров арамидным волокном.

Например, в работе [3] представлена непрерывная линия локальной гибки-формовки, включающая эластичный композитный инструмент, для получения гофрированного листа из стали с покрытием. В работе [4] исследован процесс непрерывной локальной формовки, в котором с помощью эластичного композитного инструмента получают элементы плоских теплообменников из нержавеющей стали.

Эксперимент по осадке

Образцы выполнены из полиуретана «СКУ-ПФЛ-100» (рис. 1,*а*), а также из композитного материала (рис. 1,*б*) – полиуретана «СКУ-ПФЛ-100», армированного арамидной тканью с плотностью 190 г/м².

Осаживались цилиндрические образцы толщиной 20 мм и диаметром 50 мм на испытательной машине «INSTRON» модели «600DX-F1-G1» (рис. 2).



Рис. 1. Образцы: *а* – из «СКУ-ПФЛ-100»; *б* – из композитного материала



Рис. 2. Образцы на испытательной машине во время деформирования: *а* – образец из «СКУ-ПФЛ-100»; *б* – образец из композитного материала

Результатом эксперимента по осадке является зависимость деформирующей силы от перемещения пуансона (рис. 3). Ожидаемо, что наличие трения способствует бочкообразованию при деформировании образца из «СКУ-ПФЛ-100». Бочкообразование наблюдается и при деформировании образца из композитного материала, но уже с двух сторон от армирующего слоя. Армирование полиуретана позволило увеличить деформирующую силу на 10 кН при перемещении пуансона на 8 мм (увеличение в 1,5 раза).

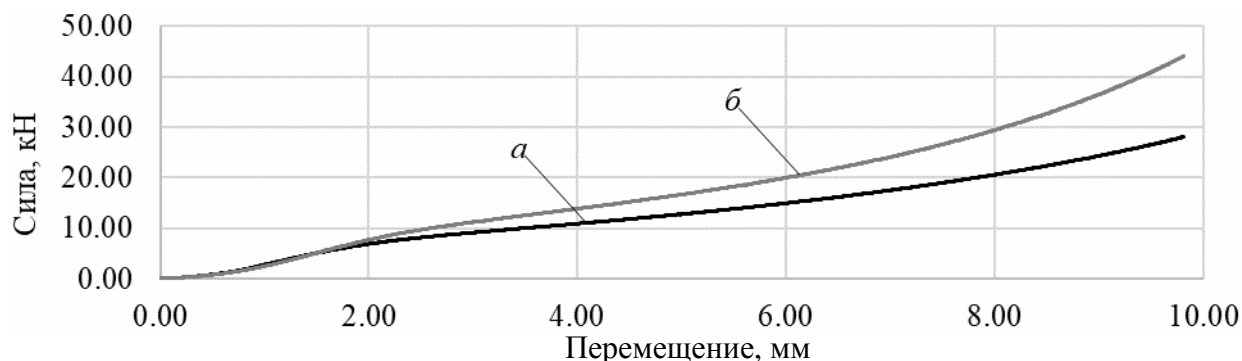


Рис. 9. Зависимость силы деформирования от перемещения пуансона: *a* – образец из «СКУ-ПФЛ-100»; *б* – образец из композитного материала

Расчет параметров математической модели Муни-Ривлина

Плотность энергии деформации для двухпараметрической модели Муни-Ривлина, φ , МПа, имеет следующий вид [5, 6]:

$$\varphi = C_{10} (I_1^* - 3) + C_{01} (I_2^* - 3) + \frac{1}{d} (I_3^* - 1)^2, \quad (1)$$

где I_3^* – редуцированный инвариант правого тензора Коши-Грина в i -ом направлении; C_{10} , C_{01} – параметры модели Муни-Ривлина, МПа; d – коэффициент несжимаемости материала, МПа⁻¹.

Зависимость напряжения от деформации, согласно (1), в осадки цилиндрического образца имеет вид:

$$\sigma = 2(\lambda^{-1} - \lambda^2)(C_{10} + \lambda^{-1}C_{01}), \quad (2)$$

где λ – относительная деформация (компонента правого тензора Коши-Грина).

$$\lambda = 1 - \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (3)$$

где h_0 – начальное значение высоты образца, мм; Δh – перемещение пуансона, мм.

Приближенное значение напряжения в точке, расположенной в центре круга на контактной поверхности образца:

$$\sigma_{эксн} = -\mu^* \frac{P}{\pi r_0^2} \lambda, \quad (4)$$

где μ^* – коэффициент, учитывающий трение между образцом и пуансоном; P – деформирующая сила, Н; r_0 – начальный радиус образца, мм.

Методом наименьших квадратов можно рассчитать параметры C_{10}, C_{01} . Результатом эксперимента является набор из N точек $P_i, \Delta h_i$, где i – индекс точки, тогда целевая функция принимает вид:

$$E(C_{10}, C_{01}) = \sum_{i=1}^N (\sigma_{эксн,i} - \sigma_i)^2. \quad (5)$$

Учет трения при расчете контактного напряжения

Тензор напряжений для напряженного состояния в точке, расположенной в центре круга на контактной поверхности образца:

$$\mathbf{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \tau \\ 0 & 0 & \tau \\ \tau & \tau & \sigma \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где τ – касательное напряжение; σ – нормальное напряжение.

Принимаем, что касательные напряжения пропорциональны нормальным с коэффициентом пропорциональности $\mu = 0,2$:

$$\tau = \mu\sigma. \quad (7)$$

Главные напряжения тензора (6) находятся из уравнения:

$$\|\mathbf{\Omega} - s\mathbf{I}\| = 0, \quad (8)$$

где s – переменная, относительно которой решают уравнение; \mathbf{I} – единичная матрица.

Главные напряжения для тензора (6) при условии (7):

$$\begin{cases} s_1 = -\frac{1 - \sqrt{1 + 8\mu^2}}{2} \sigma; \\ s_2 = 0; \\ s_3 = -\frac{1 + \sqrt{1 + 8\mu^2}}{2} \sigma. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, коэффициент, учитывающий трение между образцом и пуансоном в (4), имеет вид:

$$\mu^* = \frac{1 + \sqrt{1 + 8\mu^2}}{2}. \quad (10)$$

Для цилиндрического образца из неармированного полиуретана «СКУ-ПФЛ-100» параметры приняли следующие значения: $C_{10} = 0,51$ МПа, $C_{01} = 1,47$ МПа.

Моделирование эксперимента по осадке

Разработаны математические модели осадки цилиндрического образца как из «СКУ-ПФЛ-100» (рис. 4,а), так и композитного материала (рис. 4,б).

Использовалась квазистатическая постановка задачи, в которой пуансон перемещался в сторону матрицы на 4 мм, деформируя образец.

Поведение полиуретана при его деформировании описывалось двухпараметрической моделью Муни-Ривлина с рассчитанными выше параметрами.

Поведение арамидной ткани при ее деформировании описывалось моделью ортотропной эластичности [7]. Коэффициент трения между полиуретаном и инструментом (пуансон, матрица) – 0,2.

Результат расчета математических моделей – зависимость силы деформирования от перемещения пуансона (рис. 5). Для сравнения приведены результаты эксперимента.

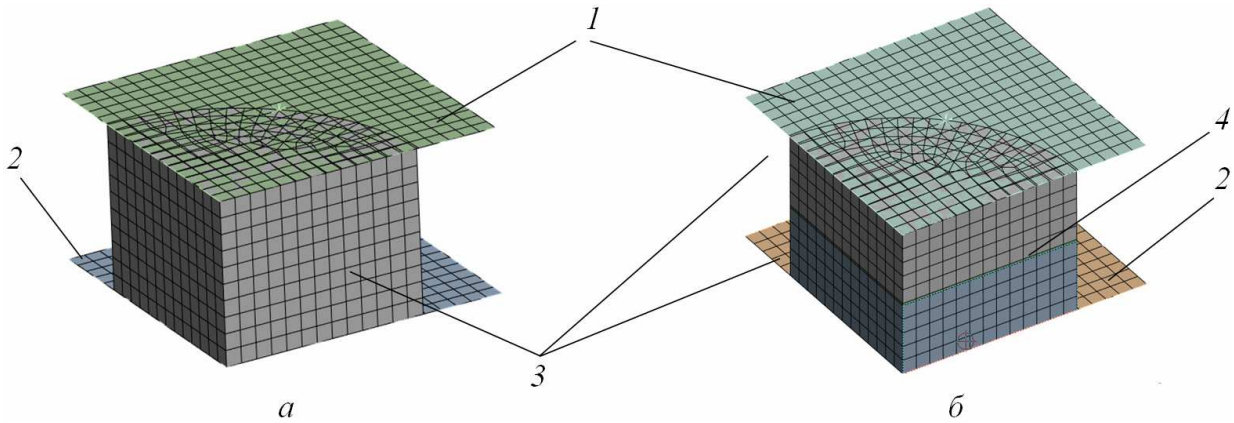


Рис. 4. Математические модели осадки цилиндрических образцов: *a* – образец из «СКУ-ПФЛ-100»; *б* – образец из композитного материала; 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – полиуретан; 4 – арамидная ткань

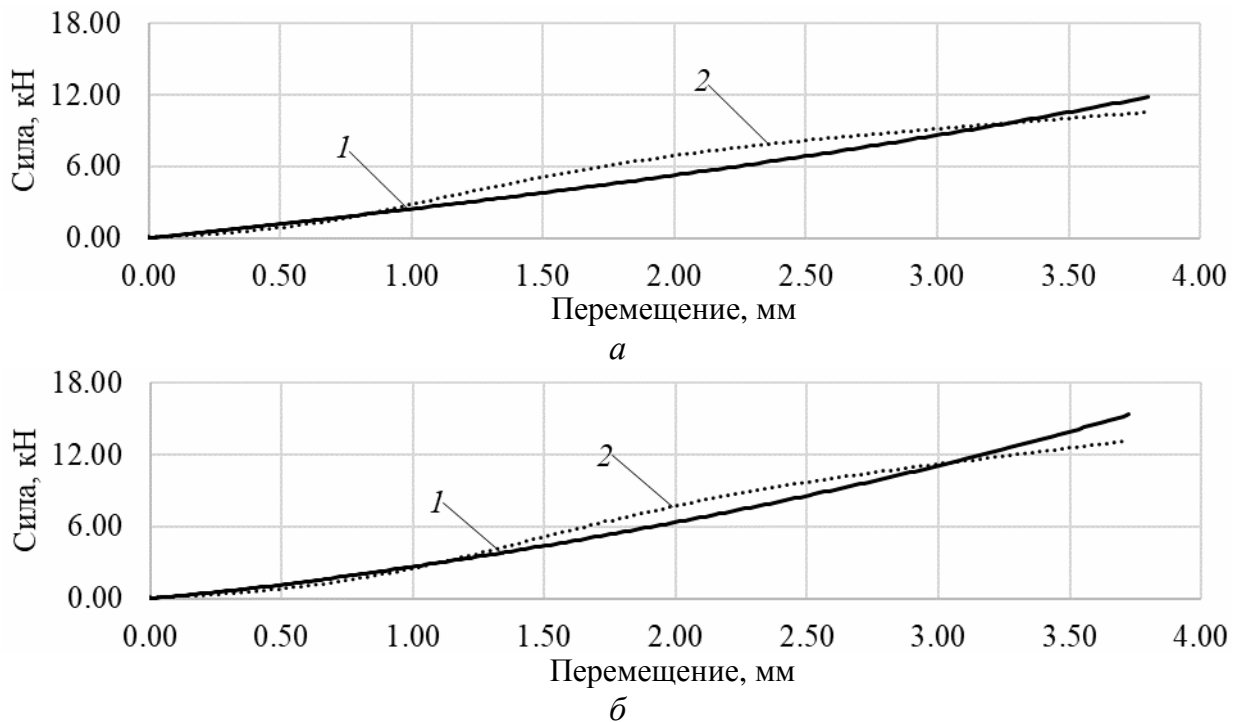


Рис. 5. Зависимость силы деформирования от перемещения пуансона при моделировании осадки: *a* – образец из «СКУ-ПФЛ-100»; *б* – образец из композитного материала; 1 – результат моделирования; 2 – результат эксперимента

Максимальные невязки между теоретической и экспериментальной кривыми до 4 мм: образец из «СКУ-ПФЛ-100», 1,9 кН (20%); образец из композитного материала, 2 кН (10%).

Заключение

Проведенный эксперимент по осадке образцов из полиуретана «СКУ-ПФЛ-100» и композитного материала показал, что армирование полиуретана позволяет увеличить силу деформирования, расширяя технологические возможности инструмента по обработке более прочных материалов.

На основе результатов эксперимента, с учетом наличия трения между контактными поверхностями образца и инструмента, рассчитаны параметры двухпараметрической модели Муни-Ривлина для образца из полиуретана «СКУ-ПФЛ-100»: $C_{10} = 0,51$ МПа, $C_{01} = 1,47$ МПа.

С рассчитанными параметрами разработана математическая модель эксперимента по осадке цилиндрического образца. Последующее сравнение результатов физического и математического экспериментов показало соответствие модели Муни-Ривлина физическому эксперименту в рассматриваемом диапазоне деформаций.

Список литературы

1. Семенов И.Е. Экспериментально-аналитическое определение характеристик армированных полиуретанов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – № 12(17). – С. 540-544.
2. Ikonnikov D.A., Semenov I.E. Thin sheet metal forming with composite material // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 734, no. 1, p. 012070.
3. Семенов И.Е., Брайко Д.А. Исследование напряженно-деформированного состояния тонколистовой заготовки при ее деформировании валками с оболочкой из композитного материала // Заготовительные производства в машиностроении. – 2022. – № 7(20). – С. 315-320.
4. Семенов И.Е., Резнюк К.Д. Исследование напряженно-деформированного состояния тонколистовой заготовки при ее деформировании новым композитным рабочим инструментом // Заготовительные производства в машиностроении. – 2022. – № 3(20). – С. 133-137.
5. Бухина М.Ф. Техническая физика эластомеров. – М.: Химия, 1984. – 224 с.
6. Муйземнек А.Ю. Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2005. – 150 с.
7. Soydan A., Tunaboylu B., Elsabagh A., Sari A., Kadir A. Simulation and experimental tests of ballistic impact on composite laminate armor // Advances in Materials Science and Engineering. 2018, pp. 1-12.

Сведения об авторах:

Семенов Иван Евгеньевич – д.т.н., профессор кафедры «Технологии обработки давлением»;

Брайко Денис Александрович – аспирант;

Резнюк Кирилл Дмитриевич – аспирант;

Акперов Камран Икметович – студент.