

*Анищенко А.С., к.т.н., доцент  
Кухарь В.В., д.т.н., профессор  
Присяжный А.Г., к.т.н., доцент  
Глазко В.В., инженер*

*ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»*

*Ясько С.Г., аспирант*

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛАСТИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ**

*Исследована упругая деформация цилиндрических образцов из полиуретана марки СКУ-7Л. Установлено, что наибольшее влияние на изменение давления деформации оказывает относительная степень деформации образца, а скорости деформирования, деформации и относительная высота образцов оказывают влияние на давление деформации в значительно меньшей степени. Определены аппроксимирующие функции выражающие зависимость давления деформации от относительной степени деформации, скорости деформирования и скорости деформации, а также относительной высоты образцов. Сделан вывод, что деформирование листовых заготовок полиуретаном целесообразно проводить на гидропрессах в режиме «выдержка заготовки под заданным давлением».*

**Ключевые слова:** *полиуретан, осадка, скорость деформации, степень деформации, давление.*

*Аніщенко О.С., к.т.н., доцент  
Кухар В.В., д.т.н., професор  
Присяжний А.Г., к.т.н., доцент  
Глазко В.В., інженер*

*ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»*

*Ясько С.Г., аспірант*

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ЕЛАСТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ**

*Досліджено пружну деформацію циліндричних зразків з поліуретану марки СКУ-7Л. Установлено, що найбільший вплив на зміну тиску деформації має відносний ступінь деформації зразка, а швидкості деформування та деформації також мають вплив на тиск деформації, але у значно меншою мірою; найменший вплив на тиск деформації дає відносна висота зразків. Визначено апроксимуючі функції, які встановлюють залежність тиску деформації від відносного ступеня деформації, швидкості деформування та швидкості деформації, а також відносної висоти зразків. Зроблено висновок, що деформування листових заготовок поліуретаном доцільно проводити на гідравлічних пресах з використанням режимів «витримка заготовки під заданим тиском».*

**Ключові слова:** *поліуретан, осідання, швидкість деформації, ступінь деформації, тиск.*

Anish'enko O., PhD, Assistant Professor  
Kukhar V., ScD, Professor  
Prysiashnyi A., PhD, Assistant Professor  
Glazko V., engineer  
SHEI «Pryazovskyi State Technical University»  
Yasko S., post-graduate  
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

## INVESTIGATION OF ELASTIC DEFORMATION OF POLYURETHANE PARTS OF THE DIE-TOOL

*The polyurethanes of different brands are widely used in designs of the deforming tool for small-scale forming of sheet metal and tubular blanks. The replacing of metal parts of the stamp-tools on the elastic makes some advantages and disadvantages of polyurethane forming process. The elastic deformation of the cylindrical samples of polyurethane grade SKU-7L and SKU-PFL was investigated. As a consequence, the equipment for forming and stamping by polyurethane requires a margin of the nominal power more than in three times greater than the force of deformation in rigid die-tools or stamp-tools. In addition, there is evidence that for drawing of complex configurations parts with polyurethane is requiring the force, almost an order of magnitude greater than the force for drawing in rigid dies. Authors found in results of analysis of the literature that the known equations for the calculation of the power modes of polyurethane deformation into account only from geometrical factors and the amount of pressure that depends on the degree of polyurethane upsetting. It should share the upsetting of elastomeric materials in closed and open volume. The information about experimental studies of the effect of compression force from deformation rate of polyurethane, which is in production conditions determined by the type and characteristics of the equipment are quite restriction, which requires the formulation and conduct the laboratory experiments on polyurethane upsetting at different rates of compression. It was experimentally studied the strain-speed and power parameters of upsetting of polyurethane grade SKU-7L and SKU-PFL in the elastic field. It is shown that pressure of upsetting primarily depends from the degree of deformation, and relative heights of samples. It is found that at least on the upsetting pressure has influence of strain rate. Equations of different species for determining the pressure of upsetting from the degree of deformation and deformation rate of polyurethane and also from the relative height of the samples. On the basis of the researches the conclusions are following. When polyurethane SKU-7L grade without limiting from the transverse deformation the increase of degree of deformation from 0.1 to 0.3 is increases the pressure in the precipitation of 2.0...2.7 times, strain rate and the decrease in 30 times (from 3.0 to 0.1 mm/sec) is reduces pressure in the upsetting in 1.7 ... 2.6 times, the most extensively (1.4...1.7 times) precipitation reduced pressure in the range of small reduction of strain rates from 0.2 to 0.1 mm/sec. Increasing of relative samples height in 1.67 times is reduces the pressure of upsetting in diapason of deformation rate 0,1...3,0 mm/sec and deformation degree 0,1...0,3 in 1.4 to 1.7 times. Analytical dependences for calculation of force parameters and pressure of forming by polyurethane from degree of upsetting, rate of deformation, strain rate and the relative height of the polyurethane samples are proposed.*

**Keywords:** polyurethane, upsetting, velocity of deformation, degree of deformation, pressure.

**Введение.** В конструкциях деформирующего инструмента для мелкосерийной штамповки листовых и трубчатых заготовок широко используются полиуретаны различных марок [1, 2]. Замена металлических частей штампов на эластичные обуславливает ряд преимуществ и недостатков процесса штамповки полиуретаном [3, 4]. Главный из недостатков – существенное увеличение силы штамповки из-за необходимости деформирования как заготовки, так и собственно полиуретана. Вследствие этого, выпускаемое оборудование для штамповки полиуретаном рассчитывают на номинальную силу, минимум втрое превышающую силу деформирования той же номенклатуры деталей в жестких штампах [3]. Кроме того, имеются сведения [4], что для вытяжки полиуретаном деталей сложных конфигураций требуется сила, почти на порядок превышающая силу вытяжки в жестких штампах.

**Анализ последних источников исследований и публикаций.** На первых этапах исследований для определения силы штамповки  $P$  деталей полиуретаном была предложена универсальная формула [5]:

$$P = q \times F, \quad (1)$$

где  $q$  – давление на штамповочной операции (осадки, вырубки, вытяжки и т.п.);

$F$  – площадь контакта поверхности детали с полиуретаном.

Параметр  $q$  задавался таблично, зависел лишь от степени деформации и для полиуретанов марок СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ находился в пределах 0,7...4,1 и 3,0...20,5 МПа соответственно.

В методических указаниях [6], помимо таблиц и номограмм, был предложен ряд формул, позволяющих для конкретных операций листовой штамповки рассчитывать  $q$  как функцию конфигурации деталей, физико-механических свойств листового материала, его толщины и высоты вырезных шаблонов штампов. При расчете общей силы  $P$  было предложено в формулу (1) ввести коэффициент  $k = 1,3$ , учитывающий потери на трение и сжатие полиуретана.

Кроме вышеназванных формул, в которых отсутствуют физико-механические параметры деформирования полиуретана, различными исследователями [4, 7, 8] были предложены зависимости силы штамповки  $P$  полиуретаном, в которых задействован модуль упругости полиуретана и его геометрические параметры, изменяющиеся при деформировании. В этих формулах сила  $P$  представляет собой сумму двух величин: первая определяет силу штамповки детали, а вторая – силу, затрачиваемую на локальное формоизменение полиуретана в зоне контакта с заготовкой.

Однако и эти зависимости внутренне противоречивы. Во-первых, модуль упругости полиуретана, указываемый в паспортных характеристиках, определяется испытаниями на свободную осадку образцов, тогда как большинство операций штамповки полиуретаном характеризуются его сжатием в замкнутом объеме. В частности, статический модуль упругости полиуретана с твердостью  $ShA = 80...82$ , определенный по стандартной методике [9], равен 18...21 МПа. А величина модуля объемного сжатия полиуретана СКУ-7Л с такой же твердостью находится в пределах 4100...4800 МПа при давлениях сжатия 200...1000 МПа [10]. Во-вторых, модуль упругости не является постоянной величиной, его значение изменяется в процессе деформации полиуретана, зависит от контактных условий трения с материалом заготовки [8] и разогрева при деформации. В-третьих, полиуретан является аморфным материалом, поэтому силовые параметры его деформирования должны зависеть как от степени, так и от скорости деформации [11].

В работе [12] получены характеристики силовых режимов сжатия полиуретана применительно к процессам резки листового металла упругими средами. Здесь для нахождения силовых характеристик предварительно определяют давление сжатия

полиуретана по графическим зависимостям, учитывая вид упругой среды (резина, полиуретан). В источнике [13] предложены зависимости для определения толщины упругого шаблона-пуансона, при этом указанные здесь эмпирические формулы не включают в себя характеристики эластичного материала. Отметим, что данные результаты относятся к процессам сжатия эластичных сред в закрытом объеме (контейнере). С точки зрения комплексного учета физико-механических условий деформирования эластичных сред при расчетах силовых характеристик и перемещений весьма интересны результаты, обобщенные в автореферате [14]. Здесь получены универсальные (на случай трехмерного напряженно-деформированного состояния) реологические соотношения, описывающие изотермическое вязкоупругое поведение деформируемых элементов из эластомерных материалов. Однако практическая реализация разработанной математической модели является затруднительной, т.к. она не имеет инженерного вида и требует использования вычислительной техники со специализированными пакетами для конечноэлементного моделирования деформации эластичных материалов.

В работах [15 – 17] приведены зависимости силовых характеристик свободно сжимаемого полиуретана от степени сжатия и геометрических факторов. При этом, т.к. исследования проведены на цилиндрических [15], кольцевых [16] и двухслойных [17, 18] образцах, в качестве геометрических параметров учтены факторы формы ( $\Phi$ ), коэффициенты формы  $K_{фор} = (0,8 + \Phi)$  и коэффициенты перекрытия  $K_{пер}$ . Влияние скорости деформирования на силовые режимы в данных работах не рассматривали.

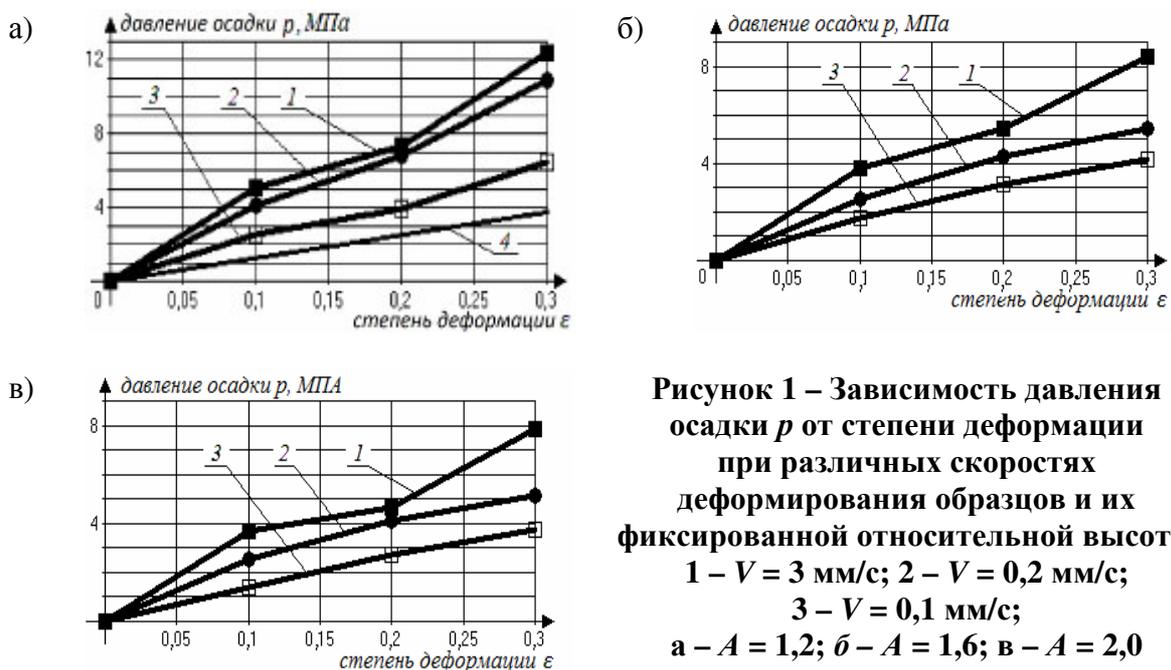
**Выделение не решенных ранее частей общей проблемы.** Известные формулы для расчета силовых режимов деформации полиуретана учитывают только геометрические факторы и величину давления, которая зависит от степени осадки полиуретана. При этом следует разделять осадку эластомерных материалов в закрытом и открытом объеме. Сведения об экспериментальных исследованиях влияния на силу сжатия полиуретана скорости деформации, которая в производственных условиях определяется видом и характеристиками оборудования, являются весьма ограниченными, что требует постановки и проведения лабораторных опытов по осадке полиуретана при различных скоростях сжатия.

**Постановка цели исследования.** Целью настоящего исследования является выявление скоростных и деформационных зависимостей давления осадки образцов различной относительной высоты из полиуретана для уточнения формул, определяющих общую силу штамповки полиуретаном, и изыскания путей снижения силовых режимов.

**Основной материал и результаты.** Опыты проводили на цилиндрических образцах  $\varnothing 30 \times 12$  мм из полиуретана марки СКУ-7Л с твердостью по Шору  $ShA = 80 \dots 82$ . Торцовые поверхности образцов имели шероховатость, определяемую качеством литья исходных плит. Боковые поверхности имели шероховатость в пределах  $\sqrt{R_z 80} \dots \sqrt{R_z 60}$ . Для изменения относительной высоты  $A = H_0/D_0$ , где  $H_0$  и  $D_0$  – соответственно исходная высота и диаметр образца, применяли составные образцы в виде стопок из 3...5 монолитных образцов вышеуказанных размеров. Тем самым условия деформирования приближали к реальным процессам листовой штамповки, в которых полиуретан находился в контейнерах или поверх деформируемых заготовок в виде слоев из нескольких плит. Степень деформации  $\varepsilon$  определяли по формуле:  $\varepsilon = (H_0 - H) / H_0$ , где  $H_0$ ,  $H$  – начальное и текущее значения высот образца, мм. Скорость деформации  $\zeta$ ,  $c^{-1}$  при осадке определяли по формуле  $\xi = V/H$ , где  $V$  – скорость деформирования, мм/с.

Эксперименты проводили на испытательной машине Р-20 в интервале степеней деформации  $\varepsilon = 0 \dots 0,3$  с шагом 0,1 при скоростях деформирования: 0,1, 0,2 и 3,0 мм/с. Интервал степеней деформации определялся тем, что  $\varepsilon = 0,3$  – предельное значение деформации полиуретана в упругой области, после которого он начинает деформироваться пластически. Скорости деформирования  $V = 0,1$  и 3,0 мм/с являются минимальной и максимальными скоростями перемещения активного захвата машины Р-20. Они обеспечиваются машиной также и при приложении активной нагрузки. Промежуточное значение скорости деформирования 0,2 мм/с выбрано, исходя из стабильности работы машины Р-20 при этой скорости перемещения захватов.

На рис.1 представлены зависимости давления осадки  $p$  от степени деформации при различных скоростях деформирования (0,1, 0,2 и 3 мм/с). Графики показывают увеличение давления осадки с ростом степени деформации для всех скоростей деформирования. Минимальная интенсивность роста  $p$  наблюдается при  $V = 0,1$  мм/с.



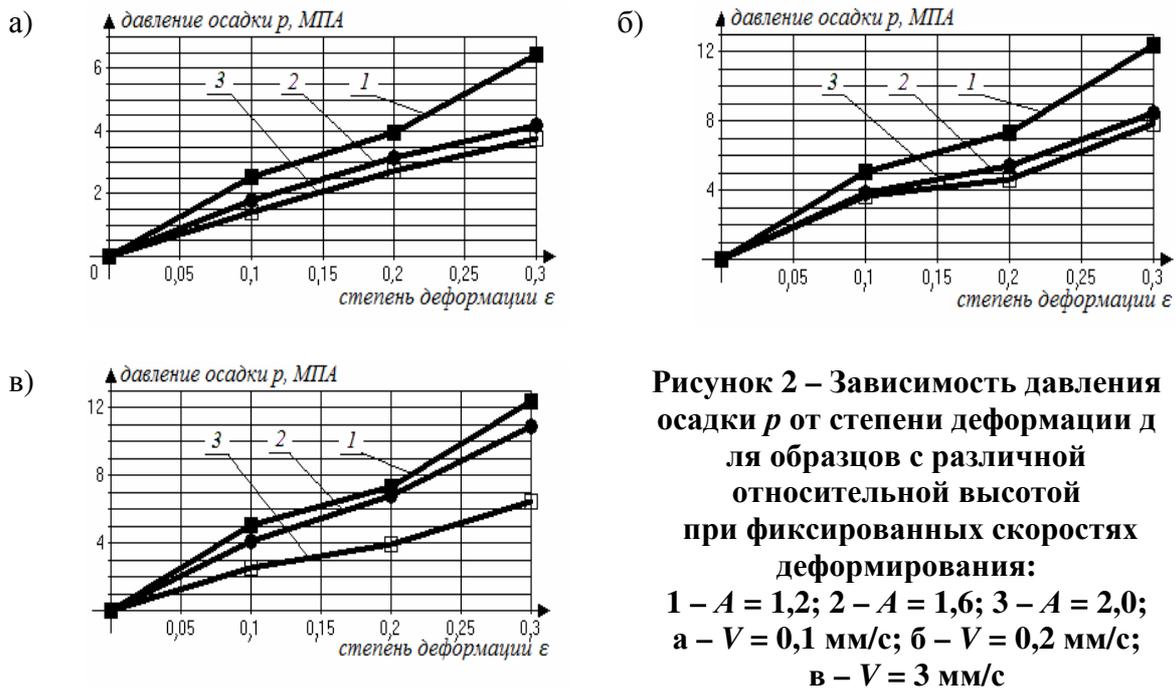
**Рисунок 1 – Зависимость давления осадки  $p$  от степени деформации при различных скоростях деформирования образцов и их фиксированной относительной высоте:**  
**1 –  $V = 3$  мм/с; 2 –  $V = 0,2$  мм/с;**  
**3 –  $V = 0,1$  мм/с;**  
**а –  $A = 1,2$ ; б –  $A = 1,6$ ; в –  $A = 2,0$**

С увеличением скорости деформирования абсолютные значения давления осадки и интенсивность его роста возрастают. При росте степени деформации до 0,2 графики близки к прямой линии. С повышением степени деформации до 0,3 угол наклона  $\alpha$  к оси  $\varepsilon$  возрастает. При скорости деформирования 3 мм/с зафиксированы наибольшие значения давления осадки, что доказывает влияние параметра  $V$  на силовые режимы деформирования полиуретана. Графики имеют наибольший угол наклона к оси  $\varepsilon$ , состоят из ломаных отрезков и могут быть описаны уравнениями типа параболы и т.п.

Из рис. 1 можно сделать следующие выводы: 1) рост степени деформации с 0,1 до 0,3 увеличивает давление осадки в 2,0 – 2,7 раза в исследуемых интервалах параметров  $V$  и  $A$ ; 2) снижение скорости деформирования в 30 раз (с 3,0 до 0,1 мм/с) снижает давление осадки в 1,7 – 2,6 раза, при этом наиболее интенсивно (в 1,4 – 1,7 раза) давление осадки снижается в интервале уменьшения малых скоростей деформирования с 0,2 до 0,1 мм/с. На рис. 1, а для сравнения с полученными нами данными представлен график 4, заимствованный из работы [2]. Он относится к осадке кольцевых образцов с относительной высотой 0,8 из полиуретана СКУ-7Л. Как видно из рис. 1, а, график пригоден для использования лишь при низких скоростях деформирования. Во всех остальных случаях он дает в 2,5...3,5 раза заниженные значения давления осадки.

Полученные результаты в несколько раз превышают табличные данные для давления штамповки полиуретаном, рекомендуемые в работе [5]. К примеру, для  $\varepsilon = 0,3$ :  $p/q = 3$  при  $V = 3$  мм/с,  $p/q = 2$  при  $V = 0,2$  мм/с и лишь при  $V = 0,1$  мм/с давление осадки соответствует верхнему пределу (4,1 МПа) параметра  $q$ .

Влияние относительной высоты образцов на давление осадки при фиксированных скоростях деформирования наглядно представляют графики на рис. 2. При скоростях деформирования 3 мм/с абсолютные значения снижения давления осадки с ростом  $A$  наибольшие, в частности, давление осадки снижается: при  $\varepsilon = 0,1$  – с 5,1 до 3,7 МПа (в 1,4 раза); при  $\varepsilon = 0,2$  – с 7,4 до 4,6 МПа (в 1,6 раза); при  $\varepsilon = 0,3$  – с 12,4 до 7,8 МПа (в 1,6 раза). При  $V = 0,1$  мм/с с ростом  $A$  параметр  $p$  снижается в 1,6 – 1,7 раза при всех сравниваемых значениях степени деформации.



Таким образом, увеличение относительной высоты образцов в 1,67 раза снижает давление осадки в диапазонах  $V = 0,1 \dots 3,0$  мм/с и  $\varepsilon = 0,1 \dots 0,3$  в 1,4 – 1,7 раза.

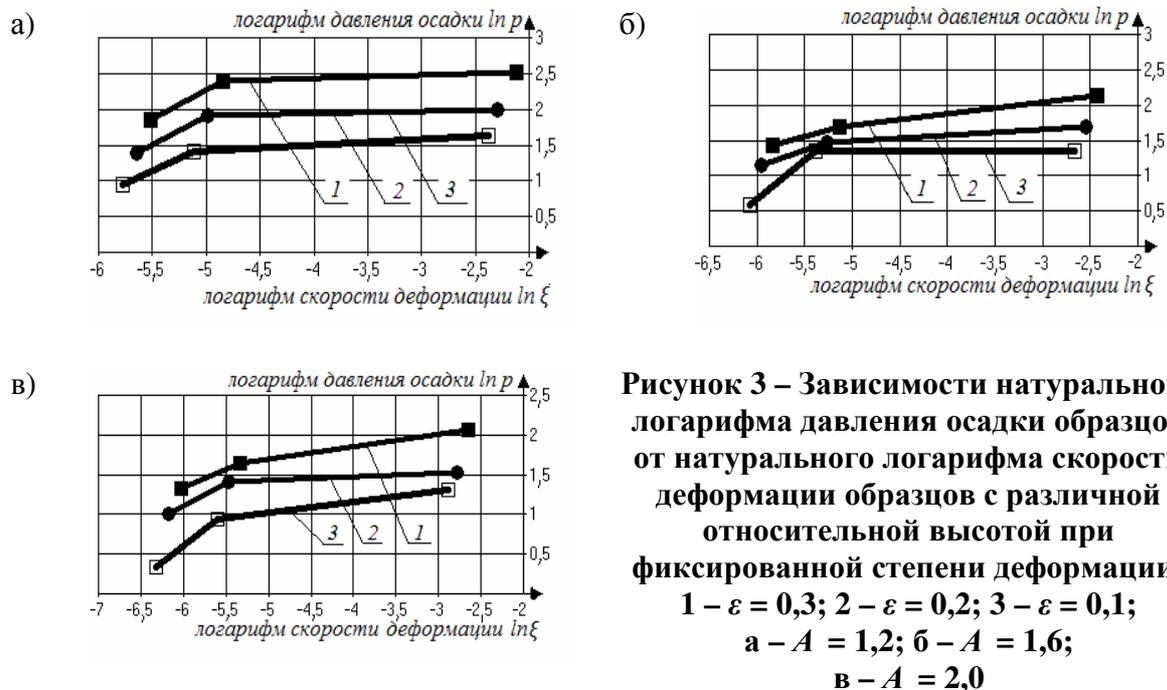
Для определения влияния скорости деформации на давление осадки были использованы зависимости  $\ln p = f(\ln \xi)$ , в которых графики выглядят в форме прямых линий. Характер влияния скорости деформации на давление осадки определялся по тангенсу угла  $\alpha$  наклона прямых к оси  $\ln \xi$ . В литературе [2] этот параметр больше известен как коэффициент скоростного упрочнения  $m$  в уравнениях связи типа  $p = k \xi^m$ .

На рис. 3 представлены скоростные зависимости давления осадки исследуемых образцов при фиксированных значениях степени деформации. Графики показывают, что чувствительность изменения давления осадки к изменению скорости деформации во всем диапазоне степеней деформации выше в интервале малых скоростей деформации:

- для образцов с  $A = 1,2$  при  $\xi = (3 \dots 8) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  тангенс угла наклона графиков к оси  $\ln \xi$  (он же – параметр  $m$ ) составляет  $\text{tg } \alpha = m = 0,71 \dots 0,79$ ;
- для образцов с  $A = 1,6$  при  $\xi = (2,3 \dots 5,9) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  –  $\text{tg } \alpha = m = 0,46 \dots 0,87$ ;
- для образцов с  $A = 2,0$  при  $\xi = (1,8 \dots 4,8) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  –  $\text{tg } \alpha = m = 0,45 \dots 0,97$ .

Увеличение скорости деформирования с 0,2 до 3 мм/с резко снижает зависимость давления осадки от скорости деформации образцов. В частности:

- для образцов с  $A = 1,2$  при  $\xi = 8 \cdot 10^{-3} \dots 1,2 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  –  $\text{tg } \alpha = m = 0,05 \dots 0,08$ ;
- для образцов с  $A = 1,6$  при  $\xi = 6,9 \cdot 10^{-3} \dots 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  –  $\text{tg } \alpha = m = 0,01 \dots 0,20$ ;
- для образцов с  $A = 2,0$  при  $\xi = 4,8 \cdot 10^{-3} \dots 7,1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  –  $\text{tg } \alpha = m = 0,14 \dots 0,17$ .



Таким образом, для определения силы при штамповке полиуретаном со стандартными скоростями деформирования на гидро- и кривошипных прессах скоростными параметрами деформирования  $\xi$  и  $V$  можно пренебречь. Вязкие свойства полиуретан проявляет лишь при весьма малых скоростях деформации.

С помощью программы *Advanced Grapher* полученные экспериментальные данные были аппроксимированы аналитическими функциями, связывающими давление осадки с параметрами  $A$ ,  $V$ ,  $\epsilon$  и  $\xi$ . В программе заложены 7 типов регрессии: линейная, гиперболическая, логарифмическая, степенная, экспоненциальная, показательная и полиномиальная. Программа показала, что характер полученных экспериментальных графиков не позволяет аппроксимировать их большинством типов регрессий, кроме линейной и полиномиальной, что связано, как это было указано ранее, с близостью графиков при малых значениях  $\epsilon$  к прямым линиям.

Для аппроксимации функциями  $p = f(\epsilon)$  использовали полином третьей степени  $p = a_1 \epsilon^3 + a_2 \epsilon^2 + a_3 \epsilon + a_4$ , поскольку по оси  $\epsilon$  к трем экспериментально определенным значениям давления осадки добавляется четвертая точка с координатами  $p = 0$ ;  $\epsilon = 0$ . В формулах, выдаваемых программой, присутствовало значение коэффициента  $a_4$  с множителем  $10^{-16} \dots 10^{-18}$ , которое не учитывали из-за малости величины.

В табл. 1 представлен перечень аналитических функций, описывающих влияние степени деформации на давление осадки полиуретана в исследованных диапазонах параметров. Для полинома третьей степени коэффициент корреляции был равен  $R^2 = 1$ , однако видно, что линейными функциями с достаточно большой точностью аппроксимировать зависимости  $p = f(\epsilon)$  нельзя из-за низких значений  $R^2$ . В работе [8] также сообщалось, что связь между параметрами  $p$  и  $\epsilon$  имеет линейный характер лишь при весьма малых степенях деформации полиуретана.

**Таблица 1 – Аппроксимирующие функции, описывающие зависимость давления осадки полиуретана от степени деформации**

$A$	$V$ , мм/с	Полиномиальный тип регрессии	Линейный тип регрессии	Коэффициент корреляции $R^2$
1,2	0,1	$p=17,48\varepsilon^3-62,24\varepsilon^2+31,60\varepsilon$	$p=1,53\varepsilon+1,97$	0,68
	0,2	$p=19,71\varepsilon^3-73,91\varepsilon^2+47,99\varepsilon$	$p=2,61\varepsilon+3,29$	0,68
	3,0	$p=44,94\varepsilon^3-155,48\varepsilon^2+66,10\varepsilon$	$p=2,94\varepsilon+3,78$	0,69
1,6	0,1	$p=4,94\varepsilon^3-20,98\varepsilon^2+19,85\varepsilon$	$p=0,91\varepsilon+1,52$	0,54
	0,2	$p=11,37\varepsilon^3-43,41\varepsilon^2+29,73\varepsilon$	$p=1,17\varepsilon+2,12$	0,50
	3,0	$p=35,27\varepsilon^3-121,58\varepsilon^2+50,11\varepsilon$	$p=1,92\varepsilon+2,84$	0,63
2,0	0,1	$p=-0,14\varepsilon^3-3,96\varepsilon^2+14,40\varepsilon$	$p=0,87\varepsilon+1,26$	0,59
	0,2	$p=15,29\varepsilon^3-55,59\varepsilon^2+30,91\varepsilon$	$p=1,08\varepsilon+2,07$	0,49
	3,0	$p=44,71\varepsilon^3-150,41\varepsilon^2+51,49\varepsilon$	$p=1,81\varepsilon+2,55$	0,67

Аппроксимация зависимостей  $p = f(A)$  и  $p = f(V)$  линейными функциями также нецелесообразна, поскольку и в этом случае коэффициент корреляции находится в пределах  $R^2 = 0,4 \dots 0,8$ . Учитывая, что в экспериментах использовали по три значения параметров  $A$  и  $V$ , в качестве полиномиального типа регрессии были использованы квадратичные уравнения, для которых  $R^2 = 1$  (см. табл. 2).

**Таблица 2 – Аппроксимирующие функции, описывающие зависимость давления осадки полиуретана от скорости деформирования и относительной высоты образцов**

$A$	$\varepsilon$	Полиномиальный тип регрессии	$V$ , мм/с	$\varepsilon$	Полиномиальный тип регрессии
1,2	0,1	$p=-5,15V^2+16,85V+0,92$	0,1	0,1	$p=1,22 A^2-5,34A+7,20$
	0,2	$p=-9,73V^2+31,32V+0,93$		0,2	$p=1,00 A^2-4,78A+8,25$
	3,0	$p=-15,19V^2+49,16V+1,18$		3,0	$p=6,00 A^2+22,50A+24,80$
1,6	0,1	$p=-2,50V^2+8,45V+0,96$	0,2	0,1	$p=4,47 A^2-16,34A+17,25$
	0,2	$p=-3,76V^2+12,43V+1,96$		0,2	$p=5,63 A^2-20,75A+23,10$
	3,0	$p=-4,08V^2+14,12V+2,79$		3,0	$p=16,09 A^2-58,69A+58,15$
2,0	0,1	$p=-4,00V^2+13,20V+0,12$	3,0	0,1	$p=3,56 A^2-13,15A+15,75$
	0,2	$p=-4,76V^2+15,43V+1,20$		0,2	$p=3,50 A^2-14,60A+19,84$
	3,0	$p=-4,33V^2+14,80V+2,36$		3,0	$p=10,59 A^2-39,61A+44,68$

Для графиков  $\ln p = f(\ln \xi)$  аппроксимирующие функции представлены в табл. 3. Анализ полученных результатов показывает, что, несмотря на существенное изменение давления осадки при варьировании параметров  $V$ ,  $\varepsilon$ , и  $A$  возможности снижения силы штамповки деталей полиуретаном имеют определенные ограничения. В частности, размещение полиуретана в замкнутом объеме контейнера [3] исключает изменение его исходных размеров. Кроме того, деформация полиуретана с подпором стенками контейнера (ограничением его поперечной деформации) характеризуется значительно большими давлениями [8, 10], модулем упругости и т.п.

Полученные в работе результаты можно использовать при штамповке деталей полиуретаном в открытом объеме [19–21], что допускает деформацию полиуретана и в направлении, перпендикулярном направлению приложения силы. В этом случае силу штамповки можно уменьшить как за счет снижения скорости деформирования, так и за счет увеличения толщины слоя полиуретана над деформируемой заготовкой (роста относительной высоты).

**Таблица 3 – Аппроксимирующие функции, описывающие зависимость давления от скорости деформации при осадке полиуретана**

$\varepsilon$	$A$	Линейный тип регрессии	Коэффициент корреляции $R^2$
0,1	1,2	$0,167\xi + 2,06$	0,92
0,2		$0,139\xi + 2,37$	0,91
0,3		$0,150\xi + 2,89$	0,92
0,1	1,6	$0,163\xi + 1,84$	0,93
0,2		$0,138\xi + 2,07$	0,93
0,3		$0,190\xi + 2,60$	0,94
0,1	2,0	$0,240\xi + 2,01$	0,93
0,2		$0,125\xi + 1,92$	0,93
0,3		$0,200\xi + 2,61$	0,94

Для этих целей перспективно использование гидропрессов с большими размерами штампового пространства. К таковым, в частности, относятся прессы для штамповки пластмасс и изотермического деформирования. Особенностью этих прессов является наличие режима работы «выдержка под давлением». Наперед заданное давление в гидроприводе устанавливается на манометре пресса, и дальнейшее деформирование заготовки происходит с силой, определяемой заданным давлением и площадью приложения этого давления к заготовке. Как правило, на этот режим работы прессы переходят к концу штамповки (при правке, калибровке и т.п.).

Однако в нашем случае этот режим обусловит такие скорости деформирования, при которых общая сила штамповки не превысит максимальную или наперед заданную силу пресса. Время штамповки увеличится до нескольких минут, тем не менее, деталь будет отштампована с силой, заведомо меньшей, чем сила штамповки при стандартных скоростях деформирования на гидро- и кривошипных прессах.

**Выводы.** При осадке полиуретана СКУ-7Л без ограничения его поперечной деформации рост степени деформации с 0,1 до 0,3 увеличивает давление осадки в 2,0–2,7 раза, а снижение скорости деформирования в 30 раз (с 3,0 до 0,1 мм/с) уменьшает давление осадки в 1,7–2,6 раза, при этом наиболее интенсивно (в 1,4–1,7 раза) давление осадки снижается в интервале уменьшения малых скоростей деформирования с 0,2 до 0,1 мм/с. Увеличение относительной высоты образцов в 1,67 раза снижает давление осадки в диапазонах  $V = 0,1 \dots 3,0$  мм/с и  $\varepsilon = 0,1 \dots 0,3$  в 1,4–1,7 раза. Для расчетов силовых параметров штамповки полиуретаном предложены аналитические зависимости давления осадки от степени и скорости деформации, скорости деформирования и относительной высоты образцов из полиуретана.

#### *Литература*

1. *Машиностроение. Раздел III. Технология производства машин: энциклопедия в 40 т. / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) [и др.]. – М. : Машиностроение, 1996. – 736 с.*
2. *Григорьев Л. Л. Холодная штамповка: Справочник / Л. Л. Григорьев, К. М. Иванов, Э. Е. Юргенсон. – С-Пб. : Политехника, 2009. – 665 с.*
3. *Мансуров И. З. Специальные кузнечно-прессовые машины и автоматизированные комплексы кузнечно-штамповочного производства: справочник / И. З. Мансуров, И. М. Подрабинник. – М. : Машиностроение, 1990. – 344 с.*
4. *Вайнтрауб Д. А. Холодная штамповка в мелкосерийном производстве: справочное пособие / Д. А. Вайнтрауб, Ю. М. Клепиков. – М. : Машиностроение, 1975. – 240 с.*
5. *Белов В. В. Штампы для листовой штамповки. Расчеты и конструирование: справочник / В. В. Белов, Г. И. Хесин. – М. : Машиностроение, 1972. – 292 с.*

6. РДМУ 95-77. Методические указания по проектированию технологической оснастки для штамповки деталей из листовых материалов эластичной средой. – М. : Госкомстандарт, 1978. – 58 с.
7. Федотов Ю. В. Определение силовых параметров процесса вырубki листовых деталей полиуретаном с интенсификацией деформационно-сдвигового разделения материала заготовки / Ю. В. Федотов // Известия СНЦ РАН. – 2009. – Т.11. – № 2-3. – С. 546 – 553.
8. Мазурин В. Л. Определение жесткости полиуретанового цилиндрического амортизатора при статическом нагружении / В. Л. Мазурин, С. Н. Яковлев // Инструмент и технологии. – 2011. – № 2. – С. 22 – 27.
9. Яковлев С. Н. О некоторых физических свойствах конструкционных полиуретанов / С. Н. Яковлев // Известия СПбТИ. – 2013. – № 20. – С. 78 – 80.
10. Барвинок В. А. Упруго-пластическое самоупрочнение (автофреттирование) толстостенных контейнеров давлением эластичной среды / В. А. Барвинок [и др.] // Известия СНЦ РАН. – 1999. – № 1. – С. 157 – 160.
11. Липатов Ю. С. Структура и свойства полиуретанов / Ю. С. Липатов, Ю. Ю. Керча, Л. М. Сергеева. – К. : Наукова думка, 1970. – 288 с.
12. Тимощенко В. А. Разделение листового металла эластичными средами / В. А. Тимощенко, В. С. Богоев; под ред. А. В. Токи; Кишиневский политехнический институт им. С. Лазо. – Кишинев : Штиинца, 1988. – 106 с.
13. Ильин Л. Н. Технология листовой штамповки / Л. Н. Ильин, И. Е. Семенов. – М. : Дрофа, 2009. – 475 с.
14. Кожушко А. А. Расчет напряженно-деформированного состояния эластомерных элементов виброизоляторов с учетом особенностей их вязкоупругого деформирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06 / А. А. Кожушко. – Омск, 2012. – 18 с.
15. Яковлев С. Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке / С. Н. Яковлев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 1(190) – С. 137 – 142.
16. Балалаева Е. Ю. Разработка автоматизированной методики расчета кольцевых упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» / Е. Ю. Балалаева, В. В. Кухарь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. – Харків, 2009. – Темат. вип.: Нові рішення в сучасних технологіях, № 31. – С. 55 – 63.
17. Кухарь В. В. Аналитическое исследование работы универсального упругого компенсатора погрешностей направления ползуна / В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева // Вісник Кременчуцького державного політехнічного ун-ту ім. М. Остроградського / КДПУ. – Кременчук, 2008. – Вип. 5 (52), Ч.2. – С. 57–60.
18. Балалаева Е. Ю. Расчет универсальных упругих поворотных компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» для операции вытяжки-формовки / Е. Ю. Балалаева // Обработка материалов давлением. – 2011. – №1(26). – С. 193 – 198.
19. Ефимов Н. А. Технологические возможности штамповки-вырезки листовых деталей полиуретаном в открытом объеме / Н. А. Ефимов // Вестник СамГАПС. – 2006. – № 6. – С. 12 – 16.
20. Computer-aided modeling of the rubber-pad forming process / M. Benisa, B. Babic, A. Grbovic, Z. Stefanovic // Materials and technology. – 2012. – № 46. – P. 503 – 510.
21. Calculation of universal elastic compensator applied to the pressing-extrusion operations / V. Kukhar, E. Balalayeva, O. Tuzenko, V. Burko // Multidisciplinary Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – P. 593 – 604.

© Аніщенко О.С., Кухар В.В., Присяжний А.Г., Глазко В.В., Ясько С.Г.  
Стаття надійшла 24.09.2015