

УДК 621.735.3:621.73.073:539.371

© Анищенко А.С.<sup>1</sup>, Кухарь В.В.<sup>2</sup>, Присяжный А.Г.<sup>3</sup>,  
Глазко В.В.<sup>4</sup>**СКОРОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ**

*Изучены деформационно-скоростные и силовые параметры осадки полиуретана СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ в упругой области. Показано, что давление осадки, в первую очередь, зависит от степени деформации и относительной высоты образцов. В меньшей мере на давление осадки оказывает влияние скорость деформации. Предложены формулы различного вида, определяющие зависимость давления осадки от степени, скорости деформации и деформирования полиуретана, а также относительной высоты образцов.*

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

*Анищенко О.С., Кухарь В.В., Присяжный А.Г., Глазко В.В. Швидкісне зміцнення поліуретанових елементів штампового оснащення. Вивчено деформаційно-швидкісні і силові параметри осадки поліуретану СКУ-7Л і СКУ-ПФЛ в пружній області. Показано, що тиск осадки, в першу чергу, залежить від ступеня деформації і відносної висоти зразків. У меншій мірі на тиск осадки впливає швидкість деформації. Запропоновані формули різного виду, що визначають залежність тиску осадки від ступеня, швидкості деформації та деформування поліуретану, а також відносної висоти зразків.*

**Ключові слова:** поліуретан, осаджування, швидкість, ступінь, деформація, тиск.

**O.S. Anishchenko, V.V. Kukhar, A.G. Prysiazhnyi, V.V. Glazko. Velocity hardening of polyurethane parts of die-tools.** The authors investigated the elastic deformation of the cylindrical polyurethane samples. The samples were 30 mm in diameter and consisted of 3-5 parts along the full extent of the sample. The height of each part is 12 mm, the relative height of the samples was equal to 1,2, 1,6 and 2,0. Deforming force, directed along the axis of the sample, was applied to the butt end of the sample. The relative degree of deformation was equal to 0,1, 0,2 and 0,3. The experiments were carried out at the deforming speed equal to 0,1, 0,2 and 3,0 millimeters per second. The authors have found out that relative degree of the sample deformation has the greatest impact on the change in deformation pressure. Rate of deforming and deformation rate also influence on deformation pressure but much less. Relative height of the samples has the least impact on the deformation pressure. The authors have identified approximating functions to be of linear type and in the form of polynoms. The functions state that the deformation pressure depends on the relative degree of deformation, rate of deforming and deformation rate and the relative height of the samples as well. Experiments have shown that: 1) if the relative increase of deformation degree is trebled the deformation pressure increases 1,8-2,4 times; 2) 30 times decrease of deforming rate reduces deformation pressure 2-2,7 times. 3) if the relative height of the samples increases 1,7 times deformation pressure decreases 1,4-1,7 times. The authors have concluded that deformation of sheet billets by means of polyurethane must be carried out on hydraulic presses using the modes «keep-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [as4@ya.ru](mailto:as4@ya.ru)

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [kvv\\_mariupol@mail.ru](mailto:kvv_mariupol@mail.ru)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [andrejprisyazhnyi@yandex.ru](mailto:andrejprisyazhnyi@yandex.ru)

<sup>4</sup> инженер, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [glazkovlad@yandex.ru](mailto:glazkovlad@yandex.ru)

*ing billets under a predetermined pressure». In this case, the press automatically sets the deforming speed at which the punching power does not exceed the maximum force of the press. Authors have established polyurethane deformation pressure high sensitivity to its deformation rate over the investigated interval. Polyurethane velocity hardening coefficient at these rates of deformation is equal to  $m = 0,71-0,97$ .*

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

**Постановка проблеми.** 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 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 МПа 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  $P$  в формулу (1) было предложено 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 в зависимости от вида упругой среды (резина, полиуретан). В источнике [13] пред-

ложены 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 конечно-элементного 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.

Известные формулы для расчета силовых режимов деформации полиуретана учитывают только геометрические факторы и величину давления, которое зависит от степени осадки полиуретана. При этом следует разделять осадку эластомерных материалов в закрытом и открытом объеме [19]. 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.

**Цель статьи** – 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.

**Изложение основного материала.** 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  $\sqrt{R_{z80}} \dots \sqrt{R_{z60}}$ .

Для изменения относительной высоты  $A = H_0/D_0$  ( $H_0$ ,  $D_0$  – 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

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H}{H_0},$$

где  $H_0$ ,  $H$  – начальное и текущее значение высоты образца, мм.

Скорость деформации  $\xi$  ( $c^{-1}$ ) при осадке определяли по формуле

$$\xi = \frac{V}{H},$$

где  $V$  – скорость деформирования, мм/с.

Эксперименты проводили на испытательной машине Р-20 в интервале степеней деформации  $0 \dots 0,3$  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 0,1 и 3,0 мм/с являются минимальной и максимальной скоростью 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.

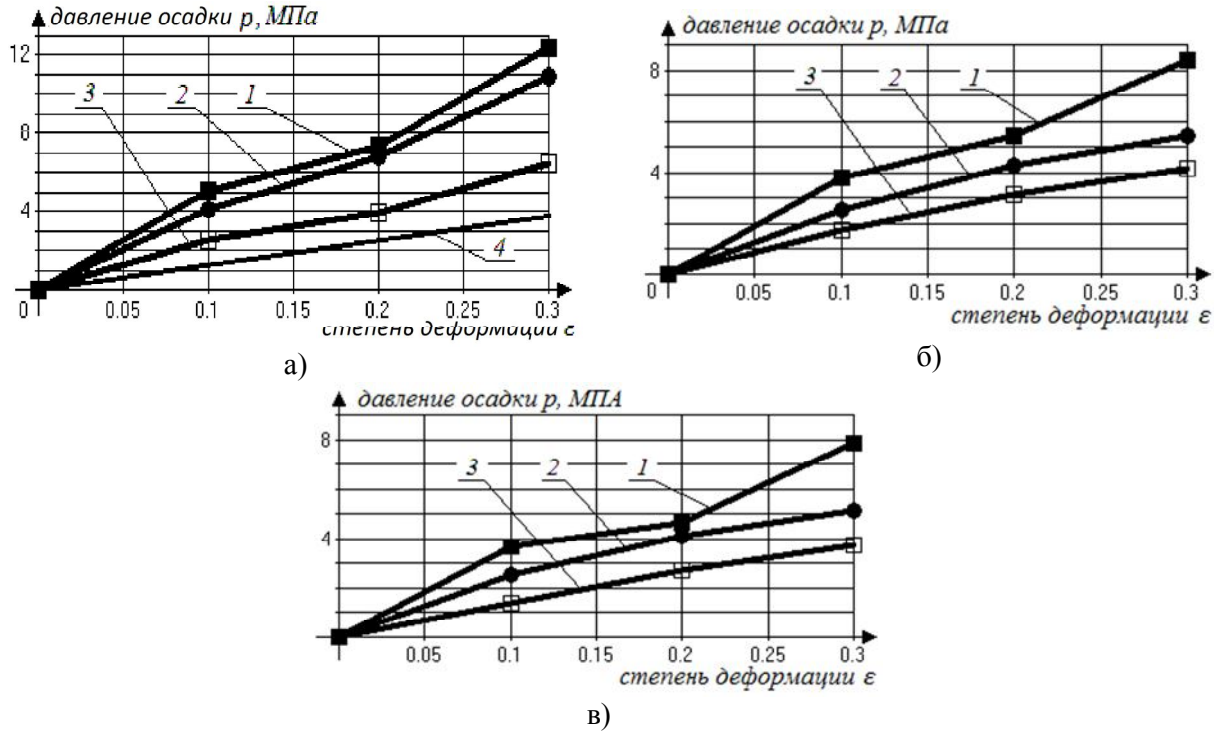


Рис. 1 – Зависимость давления осадки  $p$  от степени деформации при различных скоростях деформирования образцов при их фиксированной относительной высоте: 1 –  $V = 3$  мм/с; 2 –  $V = 0,2$  мм/с; 3 –  $V = 0,1$  мм/с; а –  $A = 1,2$ ; б –  $A = 1,6$ ; в –  $A = 2,0$

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  $\epsilon$  возрастает.

При скорости деформирования 3 мм/с зафиксированы наибольшие значения давления осадки, что прямо доказывает влияние параметра  $V$  на силовые режимы деформирования полиуретана. Графики имеют наибольший угол наклона к оси  $\epsilon$ , 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. 1а 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. 1а, 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  $\epsilon = 0,3$   $p/q = 3$  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 скоро-

стях деформування наглядно представляють графіки на рис. 2.

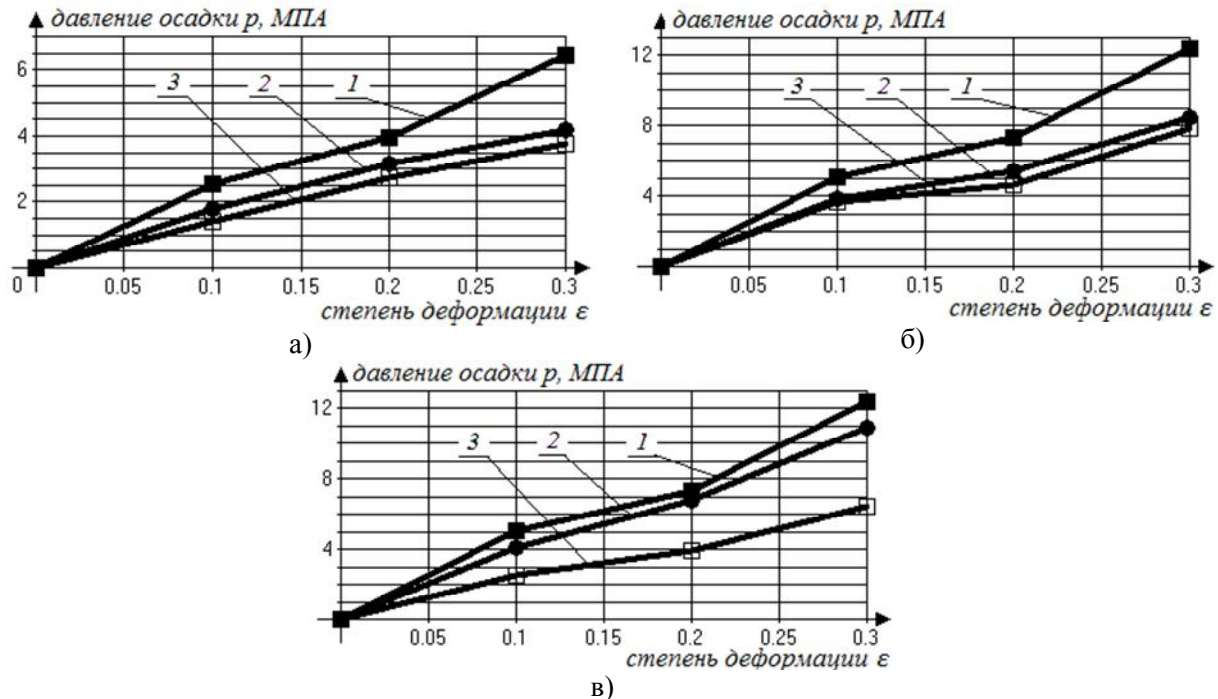


Рис. 2 – Зависимость давления осадки  $p$  от степени деформации для образцов с различной относительной высотой при фиксированных скоростях деформирования: 1 –  $A = 1,2$ ; 2 –  $A = 1,6$ ; 3 –  $A = 2,0$ ; а –  $V = 0,1$  мм/с; б –  $V = 0,2$  мм/с; в –  $V = 3$  мм/с

При скоростях деформирования 3 мм/с абсолютные значения снижения давления осадки с ростом  $A$  наибольшие, в частности, давление осадки снижается: при  $\epsilon = 0,1$  – с 5,1 до 3,7 МПа (в 1,4 раза); при  $\epsilon = 0,2$  – с 7,4 до 4,6 МПа (в 1,6 раза); при  $\epsilon = 0,3$  – 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  $\epsilon = 0,1 \dots 0,3$  в 1,4...1,7 раза.

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

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

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

Таким образом, для определения силы при штамповке полиуретаном со стандартными скоростями деформирования на гидро- и кривошипных прессах скоростными параметрами де-

формирования  $\zeta$  и  $V$  можно пренебречь. Вязкие свойства полиуретан проявляет лишь при весьма малых скоростях деформации.

С помощью программы *Advanced Grapher* полученные нами экспериментальные данные были аппроксимированы аналитическими функциями, связывающими давление осадки с параметрами  $A$ ,  $V$ ,  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  к прямым линиям.

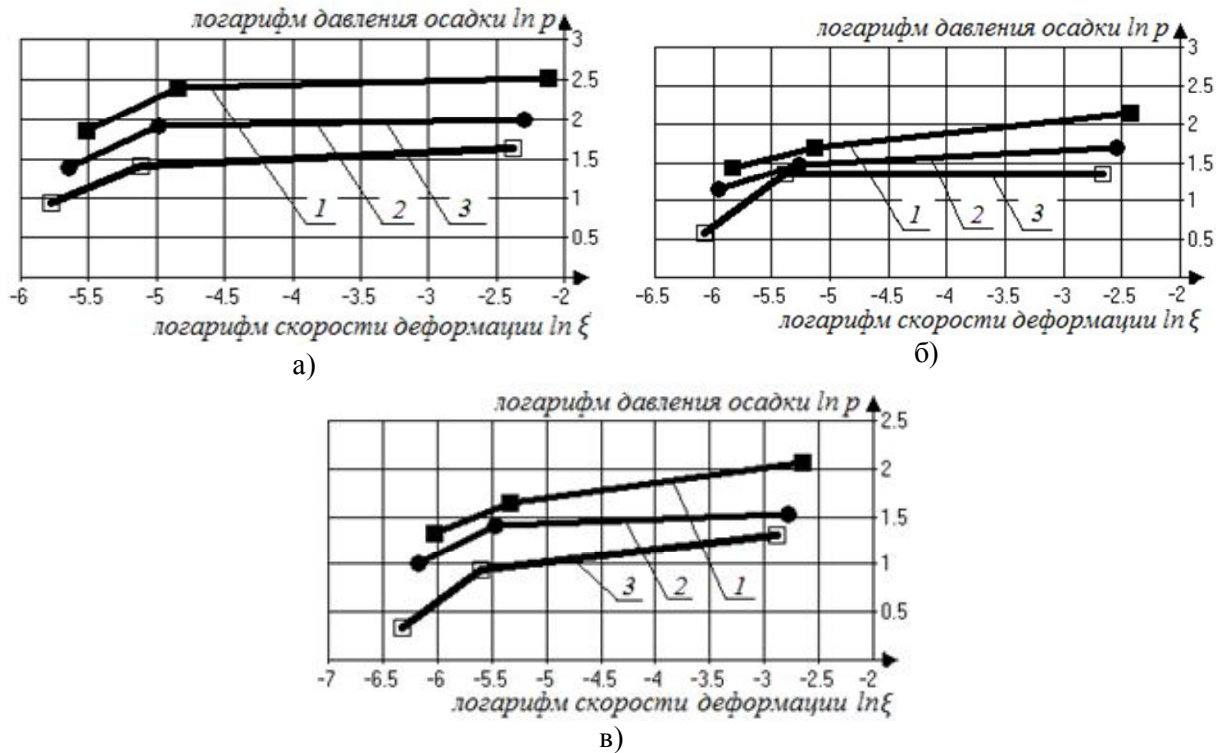


Рис. 3 – Зависимости натурального логарифма давления осадки образцов от натурального логарифма скорости деформации образцов с различной относительной высотой при фиксированной степени деформации: 1 –  $\varepsilon = 0,3$ ; 2 –  $\varepsilon = 0,2$ ; 3 –  $\varepsilon = 0,1$ ; а –  $A = 1,2$ ; б –  $A = 1,6$ ; в –  $A = 2,0$

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

В таблице 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  $p = f(\varepsilon)$  нельзя из-за низких значений  $R^2$ . В работе [8] также сообщалось, что связь между параметрами  $p$  и  $\varepsilon$  имеет линейный характер лишь при весьма малых степенях деформации полиуретана.

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 1

Аппроксимирующие функции, описывающие зависимость давления осадки полиуретана от степени деформации

A	V, мм/с	Полиномиальный тип регрессии	Линейный тип регрессии	Коэффициент корреляции, R <sup>2</sup>
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

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 таблице 3.

Таблица 3

Аппроксимирующие функции, описывающие зависимость давления от скорости деформации при осадке полиуретана

$\varepsilon$	A	Линейный тип регрессии	Коэффициент корреляции R <sup>2</sup>
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

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.

Таким образом, использовать полученные в работе результаты можно при штамповке деталей полиуретаном в открытом объеме [12], 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).

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 прессы, 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 прессы. 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

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

2. Для расчетов силовых параметров штамповки полиуретаном предложены аналитические зависимости давления осадки от степени и скорости деформации, скорости деформирования и относительной высоты образцов из полиуретана.

### Список использованных источников:

1. Машиностроение : энциклопедия в 40 т. / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) [и др.]. – М. : Машиностроение, 1996. – (Раздел III Технология производства машин). Том III-2 : Технологии заготовительных производств. – 736 с.
2. Григорьев Л.Л. Холодная штамповка: Справочник / Л.Л. Григорьев, К.М. Иванов, Э.Е. Юргенсон. – СПб. : Политехника, 2009. – 665 с.
3. Мансуров И.З. Специальные кузнечно-прессовые машины и автоматизированные комплексы кузнечно-штамповочного производства : справочник / И.З. Мансуров, И.М. Подрабиник. – 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. 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. – Киев : Наукова думка, 1970. – 288 с.
  12. Тимощенко В.А. Разделение листового металла эластичными средами / В.А. Тимощенко, В.С. Богоев. – 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; Омский гос. техн. ун-т. – 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». Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях : Зб. наук. пр. – Харків, 2009. – № 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 університету 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.

#### Bibliography:

1. Engineering : encyclopedia in 40 t. / ed. tip: K.V. Frolov (prev.) [et al.]. – М. : Mechanical Engineering, 1996. – (Section III: Technology of production machines). Т. III-2: Procuring technology. – 736 p. (Rus.)
2. Grigoriev L.L. Cold pressing Handbook / L.L. Grigoriev, K.M. Ivanov, E.E. Yurgenson. – SPb : Polytechnica, 2009. – 665 p. (Rus.)
3. Mansurov I.Z. Special metal-forming machines and automated systems of forging and stamping production: Handbook / I.Z. Mansurov, I.M. Podrabinnik. – М. : Mashinostroyeniye, 1990. – 344 p. (Rus.)
4. Weintraub D.A. Cold pressing in small-scale production : handbook / D.A. Weintraub, Y.M. Klepikov. – М. : Mashinostroyeniye, 1975. – 240 p. (Rus.)
5. Belov V.V. Stamps for sheet punching. Calculation and design: Handbook / V.V. Belov, G.I. Hedin. – М. : Mashinostroyeniye, 1972. – 292 p. (Rus.)
6. RDMU 95-77. Guidelines for the design of tooling for stamping parts from sheet material using polyurethane. – Moscow : Goskomstandart, 1978. – 58 p. (Rus.)
7. Fedotov Y.V. Determination of the process parameters of power punching sheet using polyurethane parts with the intensification of deformation and shear separation of the workpiece material / Y.V. Fedotov // Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy Science. – 2009. – Vol. 11. – № 2-3. – P. 546-553. (Rus.)
8. Mazurin V.L. Determination of hardness polyurethane cylindrical damper under static loading / V.L. Mazurin, S.N. Yakovlev // Tools and technologies. – 2011. – № 2. – P. 22-27. (Rus.)
9. Yakovlev S.N. Some physical properties of structural polyurethane / S.N. Yakovlev // Bulletin of St. Petersburg Institute of Technology. – 2013. – № 20. – P.78-80. (Rus.)

10. Elastic-plastic self-strengthening thick-walled containers pressurized elastic medium / V.A. Barvinok [et al.] // Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy Science. – 1999. – № 1. – P. 157-160. (Rus.)
11. Lipatov Y.S. Structure and properties of polyurethanes / Y.S. Lipatov, Y.Y. Kerch, L.M. Sergeeva. – Kiev : Naukova Dumka, 1970. – 288 p. (Rus.)
12. Timoshenko V.A. Separation of elastic sheet metal environments / V.A. Timoshenko, V.S. Bogoev. – Chisinau : Shtiintsa, 1988. – 106 p. (Rus.)
13. Ilyin L.N. Technology sheet metal forming / L.N. Il'in, E.I. Semenov. – M. : Drofa, 2009. – 475 p. (Rus.)
14. Kozhushko A.A. Calculation of stress-strain state of the elastomeric elements of vibration isolators with consideration of peculiarities of their viscoelastic deformation : Phd. thesis : 01.02.06 / A.A. Kozhushko; Omsk state technical university. – Omsk, 2012. – 18 p. (Rus.)
15. Yakovlev S.N. The calculation of polyurethane parts working in compression when a static load / S.N. Yakovlev // Scientific and technical Gazette of St. Petersburg state Polytechnic University. – 2014. – № 1(190) – P. 137-142. (Rus.)
16. Balalaeva E.Y. Development of an automated methodology for calculating annular elastic compensator of the errors of the system «press-stamp» / E.Y. Balalaeva, V.V. Kukhar // Reporter of the National technical university «KPI». Special issue : New solutions in modern technologies : Collection of scientific works. – Kharkiv, 2009. – № 31. – P. 55-63. (Rus.)
17. Kukhar V.V. Analytical study of the universal elastic compensator of the errors of slide direction / V.V. Kukhar, E.Y. Balalaeva // Bulletin of the Kremenchug state Polytechnic University. M. Ostrogradsky / KSPU. – Kremenchug, 2008. – Issue 5 (52), part 2. – P. 57-60. (Rus.)
18. Balalaeva E.Y. Calculation of the universal elastic rotatable compensator of the errors of the system «press-stamp» for the operation of the extrusion-molding / E.Y. Balalaeva // Processing materials by pressure. – 2011. – № 1(26). – P. 193-198. (Rus.)
19. Efimov N.A. Technological capabilities punching-cutting sheet metal parts in the open volume of polyurethane / N.A. Efimov // Bulletin of Samara State Academy of Railway Transport. – 2006. – № 6. – P. 12-16. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 26.09.2015

УДК 621.923

© Рябенков И.А.<sup>1</sup>, Анділахай В.А.<sup>2</sup>

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПО ЖЕСТКОЙ СХЕМЕ

*Обоснованы оптимальные условия шлифования, которые основаны на применении абразивного круга, работающего в режиме самозатачивания и фактически исключая трение связки круга с обрабатываемым материалом. Показана также возможность уменьшения силы резания за счет увеличения отношения скоростей круга и детали.*

**Ключевые слова:** *шлифование, резание, трение, сила резания, условное напряжение резания, технологическая система, упругое перемещение, скорость детали.*

**Рябенков І.О., Анділахай В.О. Підвищення ефективності технології врізного шліфування за жорсткою схемою. Обґрунтовано оптимальні умови шліфування,**

<sup>1</sup> канд. техн. наук, вед. інженер-технолог, ГП «Харьковский машиностроительный завод «ФЭД», г. Харьков  
<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [andilahaiv@mail.ru](mailto:andilahaiv@mail.ru)