

РАЗДЕЛ IV ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.735.3: 621.73.073: 539.371

Анищенко А. С.
Кухарь В. В.
Глазко В. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ ИЗ ПОЛИУРЕТАНА

Существующие прогрессивные процессы листоштамповочного производства, характеризующиеся высокой производительностью и качеством изделий, базируются как на использовании специальных кузнечно-прессовых машин и комплексов [1], так и на применении штампов сложной конструкции с множеством штамповых элементов и средств механизации и автоматизации [2]. Изготовление таких штампов трудоемко, занимает длительное время, а их высокая стоимость для случаев мелкосерийного производства листовых деталей является лимитирующим фактором, обуславливающим неконкурентоспособность технологического процесса штамповки как по стоимости выпускаемой продукции, так и по времени технологического цикла производства.

Этих недостатков можно избежать, если применять в штампах эластичную среду, в первую очередь, полиуретан. Изобретенный еще в 1937 году профессором Отто Бауэром из Лверкузена полиуретан лишь в 1952 году стал широко применяться в промышленности и, в частности, обработке металлов давлением [3]. В Советском Союзе полиуретан как штамповый материал долгое время игнорировался исследователями, а первые работы по его использованию при штамповке появились только к концу шестидесятых годов.

Полиуретан можно использовать для изготовления формообразующего инструмента (пуансоны и матрицы), отдельных деталей узлов выталкивания готовых изделий из формообразующих полостей и узлов прижима заготовки при вытяжке, а также демпфирующих устройств для компенсации импульсной нагрузки. Оснастка, в которой использована эластичная среда, часто в десятки раз дешевле, чем специальные или универсальные жесткие штампы [4].

Замена жестких металлических частей штампов на эластичные полиуретаны обеспечила ряд преимуществ нового процесса штамповки полиуретаном, однако выявила и его недостатки [4, 5]. Главный из недостатков – существенное увеличение силы штамповки из-за необходимости деформирования как заготовки, так и собственно полиуретана. В справочнике [5] указывается, что для вытяжки полиуретаном деталей сложных конфигураций требуется сила, почти на порядок превышающая силу вытяжки в жестких штампах. Выпускаемое оборудование для штамповки полиуретаном рассчитывают на номинальную силу, которая минимум втрое превышает силу деформирования той же номенклатуры деталей в жестких штампах [1].

В работах [6–7] были кратко проанализированы существующие подходы к определению силовых параметров штамповки полиуретаном. Было показано, что в известных формулах, предложенных для расчета силы или давления штамповки полиуретаном физико-механические свойства полиуретана, деформируемого вместе с листовой заготовкой, либо вообще отсутствовали, либо присутствовали в виде паспортного значения модуля упругости полиуретана. Однако применение этого показателя в формулах, описывающих деформаци-

онно-силовой режим штамповки деталей полиуретаном, вызывает определенные сомнения. 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. Кроме того, 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. Следует также отметить, что полиуретан является аморфным материалом и поэтому силовые параметры его деформирования должны зависеть как от степени, так и от скорости деформации [9, 10].

Целью работы является изучение влияния скорости и степени деформации при осадке в упругой области кольцевых образцов из полиуретана для корректировки зависимостей, определяющих общую силу штамповки полиуретаном.

Опыты проводили на кольцевых образцах размерами $\varnothing 60 \times \varnothing 30 \times 12$ мм из полиуретана марки СКУ-ПФЛ. Осадке подвергали составные образцы в виде стопок из трех монолитных образцов вышеуказанных размеров. Торцовые поверхности образцов имели шероховатость, определяемую качеством литья исходных плит. Боковые поверхности имели шероховатость в пределах $\sqrt{R_z 80} \dots \sqrt{R_z 60}$.

Степень деформации ε определяли по формуле

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

где H_0 , H – начальное и текущее значение высоты образца, $H_0 = 3 \cdot 12 = 36$ мм.

Скорость деформации ξ (с^{-1}) при осадке определяли по формуле

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

где V – скорость деформирования, мм/с.

Эксперименты проводили на испытательной машине Р-20 с номинальной силой 0,2 МН в интервале степеней деформации 0 - 0,3 с шагом 0,1 при скоростях деформирования 0,1, 0,7 и 3,0 мм/с.

На рис.1 представлено влияние степени и скорости деформации на силовые параметры осадки составных кольцевых образцов из полиуретана.

Графики (рис. 1, а) показывают увеличение давления осадки с ростом степени деформации для всех скоростей деформирования V . Для минимальной скорости деформирования давление осадки с ростом степени деформации возрастает от 1,06 до 6,14 МПа. При $V = 0,7$ мм/с давление осадки возрастает с 1,30 до 4,66 МПа. При $V = 3$ мм/с давление осадки изменяется в пределах 2,4 - 9,2 МПа.

В интервале степеней деформации 0,1 - 0,2 давление осадки возрастает более интенсивно, чем в других диапазонах изменения ε . Тангенс угла наклона α отрезков к оси ε составляет $\alpha = 0,4$ для осадки с $V = 3$ мм/с и постепенно уменьшается до $\alpha = 0,28$ при осадке с $V = 0,1$ мм/с, оставаясь при этом большим, чем тангенсы углов наклона графиков к оси ε в диапазоне $\varepsilon = 0 - 0,1$ ($\alpha = 0,12 - 0,24$) и $\varepsilon = 0,2 - 0,3$ ($\alpha = 0,19 - 0,28$).

Таким образом, снижение скорости деформирования в 30 раз уменьшает давление осадки в 1,5 раза при $\varepsilon = 0,3$ и в 1,23 раза при $\varepsilon = 0,1$.

Характер бочкообразования при осадке кольцевых образцов практически не отличается от осадки монолитного образца. Боковая поверхность представляет собой гладкую кривую без искажений в местах стыковки торцов образцов.

Для сравнения на рис.1а (прямая 4) представлен график, рассчитанный по зависимости $p = 52\varepsilon + 1,92$ ($0,08 \leq \varepsilon \leq 0,3$), полученной в работе [11]. Расчетные значения существенно отличаются от наших экспериментальных данных. Можно предположить, что более интенсивный рост давления осадки связан с материалом. В работе [11] использовалась модификация полиуретана СКУ-ПФЛ, имеющая наименование СКУ-ПФЛ-100. Этот полиуре-

тан более жесткий, поэтому для его деформации необходимо большее давление, чем для полиуретана СКУ-ПФЛ.

В справочнике [12] имеются данные по осадке колец из полиуретана СКУ-7Л. Один из графиков для той же, что и в наших образцах, относительной высоты кольца, представлен на рис.1а, прямая 5. Для степеней деформации $\varepsilon \leq 0,1$ график 5 практически совпадает с нашими данными для скоростей деформирования 0,1 и 0,7 мм/с. При $\varepsilon = 0,2 - 0,3$ давление осадки в 1,5 - 2 раза меньше, чем в наших экспериментах. Это можно объяснить тем, что полиуретан СКУ-7Л менее жесткий, чем полиуретан СКУ-ПФЛ.

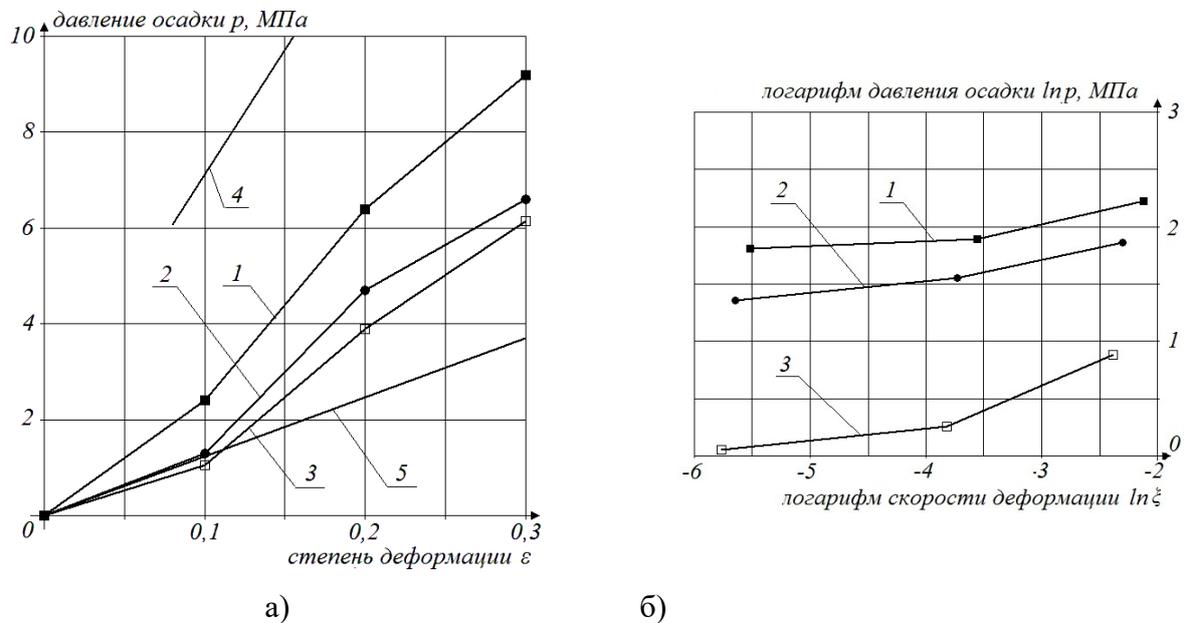


Рис.1. Влияние деформационно-скоростных режимов на силовые параметры осадки полиуретана: а) 1 – $V = 3$ мм/с; 2 – $V = 0,7$ мм/с; 3 – $V = 0,1$ мм/с; 4 – данные работы [11]; 5 – данные работы [12]; б) 1 – $\varepsilon = 0,3$; 2 – $\varepsilon = 0,2$; 3 – $\varepsilon = 0,1$

Для определения влияния скорости деформации на давление осадки были использованы зависимости $\ln p = f(\ln \zeta)$, в которых графики выглядят в форме прямых линий (рис.1б). Характер влияния скорости деформации на давление осадки определялся по тангенсу угла наклона прямых к оси $\ln \zeta$. В литературе этот параметр больше известен как коэффициент скоростного упрочнения m в уравнениях связи типа $p = k \zeta^m$.

Графики показывают, что для степени деформации $\varepsilon = 0,1$ более интенсивный рост давления происходит в интервале скоростей деформации $\zeta = 9,3 \cdot 10^{-2} - 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Тангенс угла наклона в этом диапазоне равен 0,44. С ростом степени деформации тангенс угла уменьшается и находится в диапазоне значений 0,15 - 0,23. Также незначительно влияние ζ на p в диапазоне скоростей деформации $\zeta = 3,4 \cdot 10^{-3} - 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Тангенс угла наклона графиков к оси $\ln \zeta$ для всех значений степеней деформации находится в пределах 0,10 - 0,04.

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

Полученные нами экспериментальные данные были аппроксимированы аналитическими функциями, связывающими давление осадки с параметрами V , ε и ζ . 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 ε к трем экспериментально определенным значениям давления осадки добавляется четвертая точка с координатами $p = 0$; $\varepsilon = 0$. В формулах, выдаваемых программой расчета на ЭВМ, присутствовало значение коэффициента a_4 с множителем $(10^{-16} - 10^{-18})$, которое не учитывали из-за малости величины.

В табл.1 представлен перечень аналитических функций, описывающих влияние степени деформации на давление осадки кольцевых образцов из полиуретана в исследованных диапазонах параметров.

Для полинома третьей степени коэффициент корреляции был равен $R^2 = 1$, однако видно, что с достаточно большой точностью допустима аппроксимация зависимости $p = f(\varepsilon)$ и линейными функциями ($R^2 = 0,97 - 0,99$). Вместе с тем, следует указать, что в работе [8] сообщалось, что связь между параметрами p и ε имеет линейный характер лишь при весьма малых степенях деформации полиуретана.

Таблица 1

Аппроксимирующие функции, описывающие зависимость давления осадки полиуретана от степени деформации

V , мм/с	ε , %	Полиномиальный тип регрессии	Коэффициент корреляции, R^2	Линейный тип регрессии	Коэффициент корреляции, R^2
0,1	0 - 0,3	$p = -396,67\varepsilon^3 + 208\varepsilon^2 - 6,23\varepsilon$	1	$p = 21,28\varepsilon + 0,414$	0,97
0,7		$p = -600\varepsilon^3 + 285\varepsilon^2 - 9,5\varepsilon$	1	$p = 23,2\varepsilon + 0,33$	0,97
3,0		$p = -466,67\varepsilon^3 + 320\varepsilon^2 + 6,67\varepsilon$	1	$p = 31,6\varepsilon - 0,24$	0,99
Обобщающая функция $p = 0,08\varepsilon + 2,23V$					

Для графиков $\ln p = f(\ln \xi)$ аппроксимирующие функции представлены в табл 2. Видно, что при достаточно высоких значениях коэффициента корреляции ($R^2 = 0,82 - 0,95$) вполне допустимо использовать функции линейного типа.

Таблица 2

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

ε , %	V , мм/с	Линейный тип регрессии	Коэффициент корреляции R^2
10	0,1-3,0	$0,237\xi + 1,34$	0,87
20		$0,146\xi + 2,16$	0,95
30		$0,116\xi + 2,40$	0,82

Анализ полученных результатов показывает, что их можно использовать при штамповке деталей полиуретаном в открытом объеме [4, 13–14], 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).

ВЫВОДЫ

При осадке кольцевых образцов из полиуретана СКУ-ПФЛ без ограничения его поперечной деформации с ростом степени деформации от 0,1 до 0,3 в интервале скоростей деформирования 0,1-3,0 мм/с давление осадки возрастает в 5,8-3,8 раза. Уменьшение скорости деформирования в 30 раз при $\varepsilon = 0,1-0,3$ снижает давление осадки в 1,23-1,5 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Григорьев Л. Л. Холодная штамповка: Справочник / Л. Л. Григорьев, К. М. Иванов, Э. Е. Юргенсон. – СПб.: Политехника, 2009. – 665 с.
3. Špičák P. Polyuretany využívané v technologii tváření. Bakalářská práce / P. Špičák. – Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. – 30 s.
4. Ходырев В. А. Применение полиуретана в листоштамповочном производстве / В. А. Ходырев. – Пермь: Пермское книжное издательство, 1973. – 218 с.
5. Вайнтрауб Д. А. Холодная штамповка в мелкосерийном производстве: Справочное пособие / Д. А. Вайнтрауб, Ю. М. Клепиков. – М.: Машиностроение, 1975. – 240 с.

6. Скоростное упрочнение полиуретановых элементов штамповой оснастки / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, А. Г. Присяжный, В. В. Глазко // *Вісник ПДТУ: зб. наук. праць. – Мариуполь, 2015. – Вип. 31. – С. 126–135.*
7. Исследование упругой деформации эластичных элементов штамповой оснастки / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, А. Г. Присяжный, В. В. Глазко // *Збірник наукових праць Полтавського НТУ. Серія Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПНТУ, 2016. – Вип. 1. – С. 4–13.*
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. Kwang Y. J. A constitutive model for polyurethane foam with strain rate sensitivity / Y. J. Kwang, S. C. Seong, B. M. Mahbubul // *Journal of Mechanical Science and Technology. – 2012. – V.26 (7). – P. 2033–2038.*
10. Lee C. S. A temperature and strain-rate-dependent isotropic elasto-viscoplastic model for glass-fiber-reinforced polyurethane foam / C. S. Lee, M. S. Kim, S. B. Park // *Materials and Design. – 2015. – V.84. – P.163–172.*
11. Балалаева Е. Ю. Исследование деформации кольцевого упругого компенсатора при работе системы «пресса-штамп» с перекосами ползуна / Е. Ю. Балалаева, В. В. Кухарь // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2009. – №1 (20). – С. 295–300.*
12. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке* / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
13. Гринкевич В. А. Разработка концепции бесштампового профилирования заготовок на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло // *Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр. – Харків, 2009. – № 32. – С. 26–32.*
14. Тимощенко В. А. Разделение листового металла эластичными средами / В. А. Тимощенко, В. С. Богоев. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 106 с.

REFERENCES

1. Mansurov I. Z. *Special'nye kuznechno-pressovye mashiny i avtomatizirovannye komplekсы kuznechno-shtampovochного производства: Spravochnik* / I. Z. Mansurov, I. M. Podrabinnik. – М.: Mashinostroenie, 1990. – 344 s.
2. Grigor'ev L. L. *Holodnaja shtampovka: Spravochnik* / L. L. Grigor'ev, K. M. Ivanov, Je. E. Jurgenson. – SPb.: Politehnika, 2009. – 665 s.
3. Špičák P. *Polyuretany využívané v technologii tváření. Bakalářská práce* / P. Špičák. – Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. – 30 s.
4. Hodyrev V. A. *Primenenie poliuretana v listoshtampovochном производстве* / V. A. Hodyrev. – Perm': Permskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1973. – 218 s.
5. Vajntraub D. A. *Holodnaja shtampovka v melkoserijном производстве: Spravochnoe posobie* / D. A. Vajntraub, Ju. M. Klepikov. – М.: Mashinostroenie, 1975. – 240 s.
6. *Skorostnoe uпрочнение poliuretanovyh jelementov shtampovoj osnastki* / A. S. Anishhenko, V. V. Kuhar', A. G. Prisyazhnyj, V. V. Glazko // *Visnik PDTU: zб. nauk. prac'. – Mariupol', 2015. – Vip. 31. – S. 126–135.*
7. *Issledovanie uprugoj deformacii jelastichnyh jelementov shtampovoj osnastki* / A. S. Anishhenko, V. V. Kuhar', A. G. Prisyazhnyj, V. V. Glazko // *Zbirnik naukovih prac' Poltav'skogo NTU. Serija Galuzeve mashinobuduvannja, budivnictvo. – Poltava : PNTU, 2016. – Vip. 1. – S. 4–13.*
8. Mazurin V. L. *Opredelenie zhestkosti poliuretanovogo cilindricheskogo amortizatora pri sta-ticheskom nagruženii* / V. L. Mazurin, S. N. Jakovlev // *Instrument i tehnologii. – 2011. – №2. – S. 22–27.*
9. Kwang Y. J. A constitutive model for polyurethane foam with strain rate sensitivity / Y. J. Kwang, S. C. Seong, B. M. Mahbubul // *Journal of Mechanical Science and Technology. – 2012. – V.26 (7). – P. 2033–2038.*
10. Lee C. S. A temperature and strain-rate-dependent isotropic elasto-viscoplastic model for glass-fiber-reinforced polyurethane foam / C. S. Lee, M. S. Kim, S. B. Park // *Materials and Design. – 2015. – V.84. – P.163–172.*
11. Balalaeva E. Ju. *Issledovanie deformacii kol'cevogo uprugogo kompensatora pri rabote siste-my «pressa-shtamp» s perekosami polzuna* / E. Ju. Balalaeva, V. V. Kuhar' // *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2009. – №1 (20). – S. 295–300.*
12. Romanovskij V. P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke* / V. P. Romanovskij. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 520 s.
13. Grinkevich V. A. *Razrabotka koncepcii besshtampovogo profilirovanija zagotovok na pressah s povysheniem tochnosti formoizmenenija na okonchatel'nyh operacijah* / V. A. Grinkevich, V. V. Kuhar', K. K. Diamantopulo // *Visnik NTU «HPI»: zб. nauk. pr. – Harkiv, 2009. – № 32. – S. 26–32.*
14. Timoshhenko V. A. *Razdelenie listovogo metalla jelastichnymi sredami* / V. A. Timoshhenko, V. S. Bogoev. – Kishinev: Shtiinca, 1988. – 106 s.

Анищенко А. С. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ
Кухарь В. В. – д-р техн. наук, проф. ПГТУ
Глазко В. В. – аспирант ПГТУ

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: kvv_mariupol@mail.ru, as4@ya.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2017 г.