

УДК 621.7.044

Р.Г. АРГАТ, Р.Г. ПУЗЫРЬ, О.Н. ДОЛГИХ

**ОЦЕНКА ПРИЕМОВ, УВЕЛИЧИВАЮЩИХ СТЕПЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ  
ПРИ ВЫТЯЖКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ БЕЗ СКЛАДКОДЕРЖАТЕЛЯ**

Приводятся результаты исследований, направленных на анализ и оценку эффективности существующих приемов и методов, направленных на увеличение степени деформации цилиндрических заготовок, получаемых вытяжкой без прижима фланца. Показано, что применение простой штамповой оснастки, которой являются штампы без складкодержателя, эффективно в единичном и мелкосерийном производстве. Это существенно сокращает сроки технической подготовки производства и приводит к уменьшению себестоимости деталей. Также приведены наиболее значимые факторы процесса бесприжимной штамповки, которые позволяют управлять степенью деформации, возможностью потери устойчивости в виде возникновения складок и фестонов. Важной особенностью вытяжки без прижима фланца заготовки является необходимость применения материала с различными механическими характеристиками на разных участках заготовки.

**Ключевые слова:** вытяжка; заготовка; прижим; механические характеристики; анизотропия.

Наводяться результати досліджень, спрямованих на аналіз і оцінку ефективності існуючих різних прийомів і методів, спрямованих на збільшення ступеня деформації циліндричних заготовок, одержуваних витягуванням без притиску фланця. Показано, що застосування простого штампового оснащення, яким є штампи без складкотримача, ефективно в одиничному і дрібносерійному виробництві, що істотно скорочує терміни технічної підготовки виробництва і призводить до зменшення собівартості деталей. Також наведені найбільш значущі фактори процесу непритискного штампування, які дозволяють управляти ступенем деформації, можливістю втрати стійкості у вигляді виникнення складок і фестонів. Важливою особливістю витягування без притиску фланця заготовки є необхідність застосування матеріалу з різними механічними характеристиками на різних ділянках заготовки.

**Ключові слова:** витягування; заготовка; прижим; механічні характеристики; анизотропія.

The results of studies aimed at analyzing and evaluating the effectiveness of existing various techniques and methods aimed at increasing the degree of deformation of cylindrical blanks obtained by drawing without flange pressing are presented. It is shown that the use of simple die equipment, which are stamps without a storage holder, is effective in single and small-scale production, which significantly shortens the terms of technical preparation of production and leads to a reduction in the cost of parts. Also, the most significant factors in the process of the non-pressure stamping are shown, which allow controlling the degree of deformation, the possibility of loss of stability in the form of creases and festons. An important feature of the hood without pressing the flange of the billet is the need to use a material with different mechanical characteristics at different parts of the billet.

**Keywords:** extract; blank; clamping; mechanical characteristics; anisotropy.

**Введение.** Современные мелкосерийные машиностроительные и приборостроительные производства нуждаются в эффективных технологических процессах и технологиях, которые обеспечивают необходимое качество при пониженной себестоимости изделий в условиях ускоренных сроков подготовки производства. Для сборки таких изделий применяют осесимметричные тонкостенные детали, характеризующиеся высокой точностью конструктивных размеров с достаточно малым отношением диаметра к высоте. Для их изготовления применяют методы листовой штамповки: вытяжку, отбортовку, формовку и их комбинирование.

Получение таких деталей в условиях единичного и мелкосерийного производства ограничивается точностью штампуемых деталей, высокими затратами на изготовление технологической оснастки, сроками технической подготовки производства и т. д. Повышение гибкости производства и снижение себестоимости продукции возможно при использовании простой штамповочной оснастки, однако ее применение не всегда обеспечивает необходимую точность деталей и заданную степень деформации.

**Цель работы.** Целью работы является обобщение и анализ наиболее значимых приемов и методов, расширяющих возможности вытяжки цилиндрических деталей без складкодержателя и

формирование рекомендаций для мелкосерийного и единичного производства.

**Изложение основного материала.**

Возможность использования простой оснастки, например, штампов без прижимного кольца при вытяжке осесимметричных деталей, ограничивается технологическими границами бесприжимной штамповки ( $\frac{s}{D}100 \leq 4,5(1-m_1)$  [1]), где  $s$  – толщина

заготовки;  $D$  – диаметр заготовки;  $m_1$  – коэффициент вытяжки. Приведенная зависимость характеризует начало образования складок лишь в первом приближении, так как не учитывает влияние механических свойств исходного материала, геометрии штампа и других факторов [2].

Однако по утверждению того же автора [1] степень деформации можно увеличить в данном процессе, применяя матрицы конической или криволинейной формы (рис. 1).

Так как фланец заготовки при вытяжке без складкодержателя находится в условиях плоского напряженного состояния по схеме сжатие – растяжение и не контактирует с прижимом, на нем возможно появление складок, если технологические границы, указанные выше, не выдерживаются. Для того, чтобы этого не происходило, необходимо увеличивать растягивающие напряжения и искусственно увеличивать сопротивление деформации металла фланца. Это возможно лишь при

применении металла повышенной прочности и упрочняемости при достаточно высокой пластичности» [11]

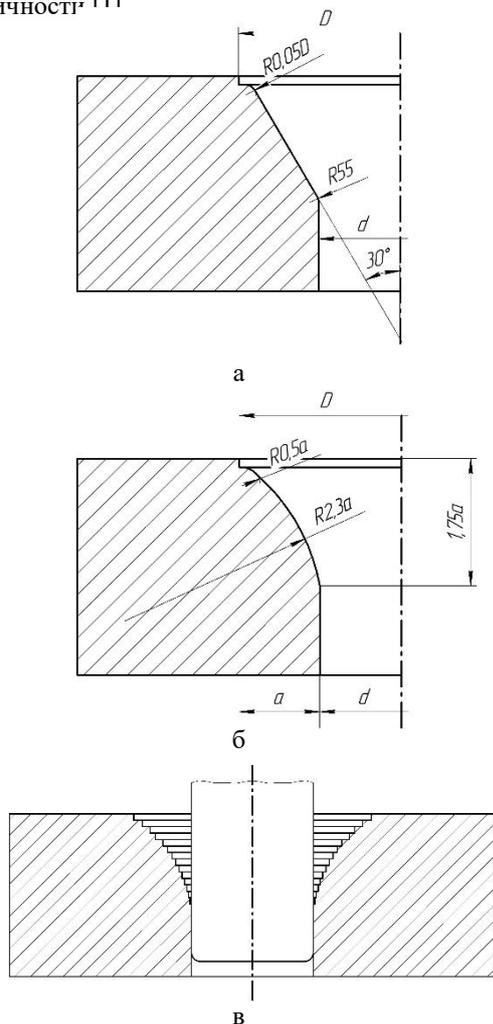


Рис. 1 – Профиль матричного отверстия при вытяжке без прижима (а – конический, б – криволинейный, в – криволинейный с закругленными рисками)

Условие, при котором не происходит образования складок при вытяжке без прижима также можно представить выражением [2]

$$\frac{s}{D} \leq 0,37 \bar{a}_c (\bar{\rho} - m_1) \sqrt{\frac{\varepsilon_{cp} (1 - \psi_p)}{\psi_p}}, \quad (1)$$

где  $\bar{a}_c = 1 - \frac{1}{1 - \psi_p} \sqrt{\frac{\sigma_a \left(\frac{\psi_p}{\varepsilon_{cp}}\right)^{1-2\psi_p}}{E}}$ ;  $\bar{\rho}$  – относительное

перемещение края заготовки;  $\varepsilon_{cp}$  – средняя деформация фланца;  $\psi_p$  – равномерное сужение образца при испытаниях на растяжение;  $\sigma_a$  – предел прочности металла;  $E$  – модуль упругости.

В этой формуле механические свойства металла характеризуются значениями  $\psi_p$  и  $\bar{a}_c$ . Чем больше способность металла упрочняться при деформировании, тем больше значение  $\psi_p$  и тем меньше предельное отношение  $s/D$  при котором начинается образование складок [2].

Большое значение при вытяжке на образование складок и фестонов оказывает показатель плоскостной анизотропии [1, 2, 3]. Если в зоне пластической деформации возникает деформированное состояние, характеризуемое сжато-растянутой схемой, штампуемость металла будет выше при величине среднего значения показателя анизотропии  $R > 1$  [3]. При этом листовой металл хорошо сопротивляется утонению в опасной зоне, что позволяет вести вытяжку с высокими степенями деформации. Вместе с тем с увеличением  $R$  нарушается осевая симметрия деформирования, возникает окружная разнотолщинность стенок вытягиваемой детали и волнистость ее кромки, что вызывает необходимость увеличения припуска на обрезку неровного края [3].

В процессе втягивания заготовки в отверстие матрицы пластическая деформация в начале охватывает участок, расположенный между пуансоном и матрицей, который растягивается в меридиональном направлении и изгибается по радиусу закругления пуансона и матрицы. Когда предел текучести этого участка превысит предел текучести участка фланца, который граничит с ним, вследствие упрочнения, тогда в зону пластической деформации поступит новый металл недеформированного фланца и весь фланец сместится в радиальном направлении. При этом во фланце вследствие уменьшения его первоначального диаметра возникают тангенциальные напряжения сжатия и наибольшее значение они принимают на торце заготовки, что и приводит к потере устойчивости в виде возникновения гофров. Для того, чтобы исключить возможность гофрообразования, необходимо применять металл повышенной прочности на торце заготовки и в непосредственной близости с ним.

Как показано в работах [4, 5] зона деформированного фланца разбивается на несколько участков в зависимости от величины возникающих в нем напряжений сжатия и растяжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Радиус, разграничивающий области утонения и утолщения, равен  $\rho = 0,607R$  [4]. Таким образом, зона фланца с размерами  $R \geq 0,607R$  находится под превалирующим действием сжимающих тангенциальных напряжений, которые могут привести к потере устойчивости с образованием в радиальных направлениях волн или складок. Чтобы этого не происходило фланец заготовки должен обладать повышенной прочностью, а та часть заготовки, которая находится между радиальным закруглением матрицы и пуансоном повышенной пластичностью и упрочняемостью.

При вытяжке цилиндрического стакана деформированное состояние фланца характеризуется соотношением  $m_c \leq 0$ , деформированное состояние стенки –  $m_c \geq 0$ , где  $m_c$  – отношение главных деформаций в плоскости листа. По исследованиям [6], если показатель анизотропии  $R > 1$  и при его

дальнейшем увеличении сопротивляемость деформированию стенки стакана будет увеличиваться, а сопротивляемость деформированию фланца – уменьшаться; в результате предельная степень вытяжки будет увеличиваться.

Но при вытяжке без прижима фланца основным фактором, который ограничивает возможности процесса, является потеря устойчивости фланцевой части заготовки, поэтому необходимо увеличивать сопротивляемость фланца деформированию и уменьшать показатель анизотропии, чтобы сохранить устойчивость процесса, так как показано выше с увеличением данного показателя возникает окружная разнотолщинность стенок вытягиваемой детали и волнистость ее кромки. При сравнении одноименных напряжений, возникающих во фланце заготовки при вытяжке ортотропного материала, в различных точках, положение которых характеризуется одинаковым расстоянием от центральной оси заготовки, но различными углами по отношению к направлению прокатки, автором [6] показано, что с увеличением показателей анизотропии  $R_x$  и  $R_y$  от 0,5 до 2 и показателя упрочнения  $n$  от 0,1 до 0,4 величина отношений одноименных напряжений в указанных точках фланца изменяется в значительных пределах и составляет 0,85 – 1,15. Следствием этого отношения является возникновение на вытянутой детали фестонов. То есть, увеличение показателей плоской анизотропии усложняет процесс вытяжки. Это подтверждается также исследованиями [5], где автор заключает, что плоская анизотропия по сравнению с вытяжкой изотропного материала дополнительно нагружает одни участки внутреннего контура фланца заготовки и разгружает другие в целом ухудшая условия вытяжки.

**Обсуждение результатов.** С одной стороны, материал для вытяжки качественных цилиндрических деталей должен обладать по рекомендациям [1] повышенной пластичностью при пониженной прочности со средним значением коэффициента плоскостной анизотропии  $R_{cp}=1,2 \div 1,7$ , с другой стороны для предотвращения складко и фестонообразования при вытяжке без прижима необходимы повышенные прочностные характеристики фланцевой части заготовки, а также стремление  $R_{cp} \rightarrow 0$ , как показано выше. Таким образом, материал заготовки для вытяжки без прижима должен обладать на разных участках рядом противоречивых механических свойств, которые будут отличаться от свойств материала для вытяжки с прижимом. Неодинаковые механические свойства металла можно достичь, применяя различные технологические и термические методы влияния, которые распространяются на вытяжку цилиндрических, овальных и коробчатых деталей: местный отжиг заготовки, нагрев фланца, местная обработка холодом и т. д. [1, 5]. Также пластические свойства металла несколько повышают, применяя перед вытяжкой дрессировку, которая способствует понижению прочностных характеристик и

повышению характеристик пластичности. Это явление, очевидно связано с эффектом Баушингера и исследуется в работах, как отечественных, так и зарубежных авторов [7–11], где для его учета принимаются модели ортотропного материала с трансляционным упрочнением [7, 10, 11], ортотропного материала с изотропным и анизотропным упрочнением [8, 9]. Модели материала позволяют учесть эффекты начальной анизотропии и деформационного упрочнения, происходящие в ходе пластического деформирования. Однако, как показывают исследования выше упомянутых авторов, эффект Баушингера проявляется в области малых пластических деформаций. В продолжении сказанного следует отметить, что после дрессировки материала перед вытяжкой иногда применяют правку на специальных машинах, имеющих несколько пар правильных валков, центры которых смещены друг относительно друга [3]. В процессе правки лист многократно пластически изгибается, что приводит к повышению прочностных характеристик и снижению характеристик пластичности, в результате штампуемость металла ухудшается [3].

**Выводы.** В результате критического обзора литературных источников, а также анализа и сопоставления имеющихся данных по процессам вытяжки цилиндрических деталей установлено: 1) процесс бесприжимной вытяжки цилиндрических деталей по схеме напряженно-деформированного состояния не отличается от процесса вытяжки с прижимом фланца; 2) вытяжка без складкодержателя не рассматривается как самостоятельный процесс листовой штамповки и применяется в тех случаях, когда необходимо понизить величину растягивающих меридиональных напряжений в опасном сечении или изготавливать детали с малым отношением высоты к диаметру; 3) наличие начальной анизотропии механических свойств металла ухудшает условия бесприжимной вытяжки и приводит к появлению фестонов и складок; 4) для обеспечения устойчивости процесса деформирования необходимо применение материалов с различным комплексом механических свойств на разных участках заготовки; 5) степень деформации можно увеличить, применяя матрицы с различной формой заходной части.

#### Список литературы

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Шофман Л.А. Элементы теории холодной штамповки / Л.А. Шофман – М.: Оборонгиз, 1952. – 335 с.
3. Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки: [учебник для вузов] / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1967. – 280 с.
5. Жарков В.А. Разработка и совершенствование процессов вытяжки деталей из листовых заготовок на основе математического моделирования: дис. доктора техн. наук: 05.03.05 / В.А. Жарков. – Москва, 1998. – 507 с.
6. Головлев В.Д. Расчеты процессов листовой штамповки (Устойчивость формообразования тонколистового металла) / В.Д. Головлев. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.

7. Бастун В.Н. Прогнозирование эффекта Баушингера в ортотропных материалах с трансляционным упрочнением при знакопеременном одноосном нагружении / В.Н. Бастун // Доповіді НАН України. – 2013. – № 10. – С. 54–64.
8. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
9. Огородников В.А. Энергия. Деформации. Разрушение. (задачи автотехнической экспертизы) / В.А. Огородников, В.Б. Киселёв, И.О. Сивак. – Винница: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 204 с.
10. Мороз Н.Н. Влияние уменьшения сопротивления материала пластической деформации после предварительно малой деформации противоположного знака при моделировании процесса сложной вытяжки автокузовных деталей / Н.Н. Мороз, А.В. Воронин, В.Л. Хорольский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 63. – С. 97–103.
11. Barlat F., Aretz H., Yoon J.W., Karabrin M.E., Brem J.C. and Dick R.E. (2005), "Linear transformation based anisotropic yield functions", Int. J. Plasticity, 21, pp. 1009–1039.
6. Golovlev V.D. *Raschetyi protsessov listovoy shtampovki (Ustoychivost formoobrazovaniya tonkolistovogo metalla)* [Calculations of the processes of sheet punching (Stability of the formation of sheet metal)] / V.D. Golovlev – Moscow: Mechanical engineering, 1974. – 136 p.
7. Bastun V.N. *Prognozirovanie efekta Baushingera v ortotropnykh materialakh s translyatsionnym uprochneniem pri znakovym nagruzenii* [Prediction of the Bauschinger effect in orthotropic materials with translational hardening under alternating uniaxial loading] / V.N. Bastun // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2013. – No 10. – pp. 54–64.
8. Del G.D. *Tehnologicheskaya mehanika* [Technological Mechanics] / G.D. Del – Moscow: Mechanical engineering, 1978. – 174 p.
9. Ogorodnikov V.A. *Energiya. Deformatsii. Razrushenie. (zadachi avtotehnicheskoy ekspertizy)* [Energy. Deformations. Destruction. (tasks of autotechnical expertise)] / V.A. Ogorodnikov, V.B. Kiselev, I.O. Sivak. – Vinnitsa: UNIVERSUM – Vinnitsa, 2005. – 204 p.
10. Moroz N.N. *Vliyaniye umensheniya soprotivleniya materiala plasticheskoy deformatsii posle predvaritelno maloy deformatsii protivopolozhnogo znaka pri modelirovani protsess slozhnoy vytyazhki avtokuzovnykh detaley* [Influence of the decrease in the resistance of the material of plastic deformation after preliminary small deformation of the opposite sign when modeling the process of complex drawing of autocube parts] / N.N. Moroz, A.V. Voronin, V.L. Khorolsky // Open information and computer integrated technologies. – 2014. – No. 63. – pp. 97–103.
11. Barlat F., Aretz H., Yoon J.W., Karabrin M.E., Brem J.C. and Dick R.E. (2005), "Linear transformation based anisotropic yield functions", Int. J. Plasticity, 21, pp. 1009–1039.

#### Bibliography (transliterated)

1. Romanovsky V.P. *Spravochnik po holodnoy shtampovke* [Cold stamping guide] / V.P. Romanovsky. – Leningrad: Mechanical engineering, 1979. – 520 p.
2. Shofman L.A. *Elementyi teorii holodnoy shtampovki* [Elements of the theory of cold stamping] / L.A. Shofman. – Moscow : Oborongiz, 1952. – 335 p.
3. Averkiev Yu.A. *Tehnologiya holodnoy shtampovki* [Cold stamping technology] / Yu.A. Averkiev, A.Yu. Averkiev – Moscow: Mechanical engineering, 1989. – 304 p.
4. Popov E.A. *Osnovy teorii listovoy shtampovki* [Fundamentals of the theory of sheet punching]: [textbook for high schools] / E.A. Popov. – Moscow : Mechanical engineering, 1967. – 280 p.
5. Zharkov V.A. *Razrabotka i sovershenstvovanie protsessov vytyazhki detaley iz listovykh zagotovok na osnove matematicheskogo modelirovaniya* [Development and improvement of the extraction of parts from sheet blanks on the basis of mathematical modeling]: dis. doctor of technical sciences. Sciences: 05.03.05 / V.A. Zharkov. – Moscow, 1998. – 507 p.

Поступила (received) 14.11.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оцінка прийомів, що збільшують ступінь деформації при витяжці циліндричних деталей без складкотримача / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузир, О. М. Долгих // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 5–9 – Библиогр.: 11 назв.– ISSN 2519-2671

Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 5–9 – Библиогр.: 11 назв.– ISSN 2519-2671

Evaluation of techniques that increase the degree of deformation in the extraction of cylindrical parts without a storage holder / Arhat, R., Puzyr, R., Dolgih, O. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 5–9. – Bibl.:11. – ISSN 2519-2671

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Аргат Роман Григорович** – старший викладач, кафедра технології машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; м. Кременчук, Україна; e-mail: argat@ua.fm

**Аргат Роман Григорьевич** – старший преподаватель, кафедра технологии машиностроения, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина; e-mail: argat@ua.fm

**Roman Arhat** – Senior Lecturer, Chair of Technology of Mechanical Engineering, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: argat@ua.fm.

**Пузир Руслан Григорович** – доктор технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; м. Кременчук, Україна; e-mail: **puzyruslan@gmail.com**

**Пузырь Руслан Григорьевич** – доктор технических наук, доцент, кафедра технологии машиностроения, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина; e-mail: **puzyruslan@gmail.com**

**Ruslan Puzyr** – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Chair of Technology of Mechanical Engineering, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: **puzyruslan@gmail.com**.

**Долгих Ольга Миколаївна** – магістрант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; м. Кременчук, Україна.

**Долгих Ольга Николаевна** – магістрант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина.

**Olga Dolgih** – Graduate student, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine.