

*к.т.н., доц. Митичкина Н.Г.,
магистр Бут А.Ю.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ В ШТАМПАХ С ПОВОРОТНЫМИ ДИСКАМИ

Представлена схема та принцип роботи сконструйованого штампуну, наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень технологічного процесу.

Комбинируемая вытяжка листового материала является одним из наиболее перспективных способов изготовления полых цилиндрических изделий относительно большой глубины, имеющих при этом высокую точность геометрических размеров и качество поверхности. Она позволяет за счёт совмещения больших степеней деформации по периметру и толщине заготовки существенно сократить число технологических операций и увеличить производительность процесса.

Однако условия деформации, характерные для комбинируемой вытяжки, приводят к чрезмерному увеличению растягивающих напряжений, действующих в опасном сечении, что, в свою очередь, увеличивает вероятность обрыва дна. Этот факт вынуждает несколько ограничивать степень деформации по толщине заготовки по сравнению с достижимой её величиной при протяжке.

Одним из способов интенсификации процесса вытяжки является использование вытяжных штампов с поворотными дисками, снижающими силу трения между заготовкой и инструментом, что позволяет уменьшить растягивающие напряжения, а, следовательно, и нагрузку на опасное сечение, и, таким образом, даёт возможность увеличить степень деформации в пределах одного перехода [1 – 6].

Основной задачей данной работы является изучение возможности повышения степени деформации при комбинируемой вытяжке за счёт применения в конструкции штампа поворотных дисков.

Исследования нового технологического процесса – комбинируемой вытяжки в штампе с поворотными дисками – проводились по двум параллельным направлениям. Первое – это теоретическое исследование возможных вариантов процесса и факторов, влияющих на него; второе – экспериментальная проверка результатов теоретического исследования.

В качестве методов теоретического исследования были выбраны метод совместного решения уравнений равновесия с условием пластичности и метод баланса работ, что облегчает сравнение полученных результатов с результатами других исследований [7].

Как было отмечено [7], для изучения напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе формоизменения решено было отдельно рассматривать три её характерных участка, с существенно различающимися схемами НДС и условиями деформирования. Они представлены на рисунке 1.

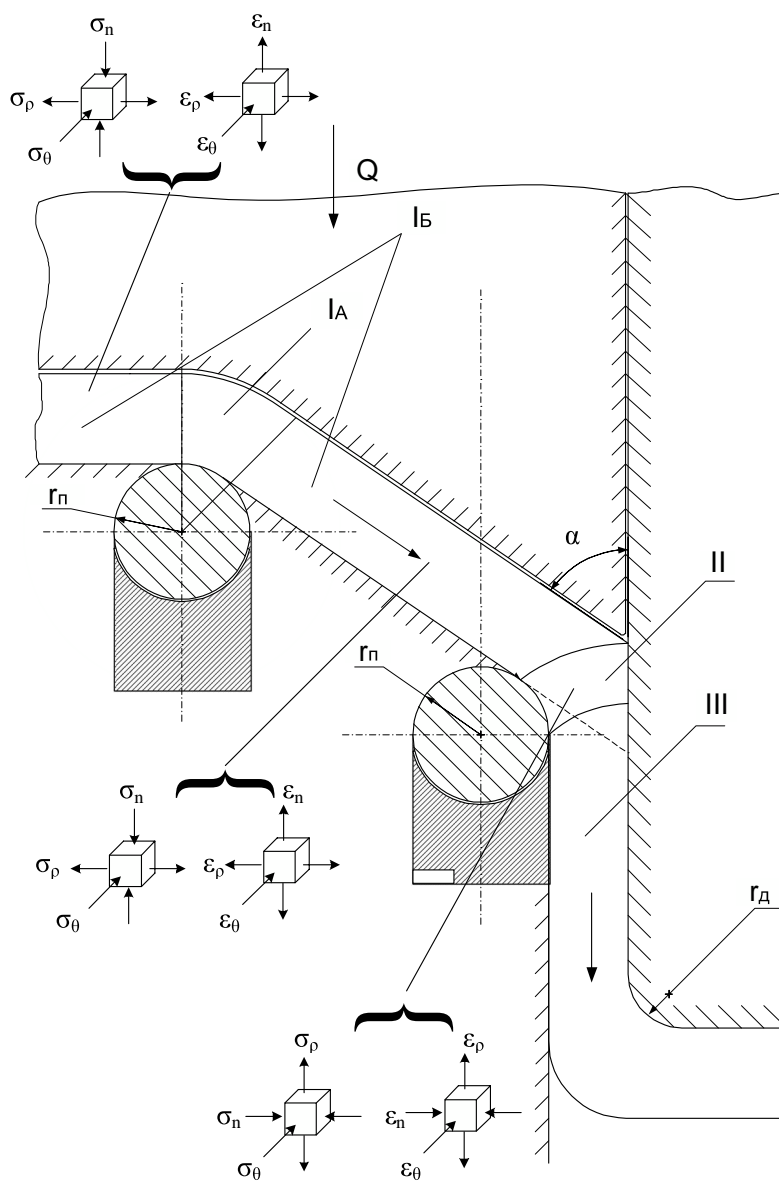


Рисунок 1 – Схема НДС участков заготовки в процессе вытяжки

На участке I, который соответствует условиям, имеющим место при обычной вытяжке с применением плоского кольцевого и тороидального складкодержателей, напряженное состояние может быть описано формулой:

$$\sigma_{\rho I} = \beta \sigma_s \left(\ln \frac{R_n}{\rho} + \frac{s_0}{4\beta R_\rho} + \frac{Q(\mu_M + \mu_{II})}{2\pi R_n s_0 \beta \sigma_s} \right), \quad (1)$$

где μ_M – это усреднённое значение коэффициента трения на поверхности контакта заготовки с подвижной (перетяжным радиусом) и неподвижной частями матрицы;

μ_{II} – коэффициент трения на поверхности контакта заготовки с прижимом;

Q – усилие прижима;

R_n – радиус по наружному контуру;

R_ρ – радиус срединной поверхности заготовки;

ρ – текущая координата;

σ_s – предел текучести материала;

β – коэффициент Лоде, учитывающий влияние среднего по величине главного нормального напряжения;

s_0 – исходная толщина заготовки.

Участок II представляет собой область с параметрами вытяжки в конической матрице с соответствующим ей по форме коническим складкодержателем. Напряженное состояние на этом участке можно определить по методу, описанному в работе [8], учитывая при этом особенности рассматриваемого процесса.

За основу принимается уравнение равновесия для конической оболочки постоянной толщины в виде:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu\sigma_\theta}{\operatorname{tg}\alpha} = 0, \quad (2)$$

где σ_ρ – радиальное растягивающее напряжение;

σ_θ – тангенциальное сжимающее напряжение;

μ – коэффициент трения;

α – угол наклона образующей матрицы к оси симметрии.

Решая его совместно с уравнением пластичности, учитывающим влияние среднего по величине главного нормального напряжения (в данном случае это σ_n):

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \sigma_s; \quad (3)$$

получаем:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \beta\sigma_s(1 + \mu \cdot ctg\alpha) - \sigma_\rho \mu \cdot ctg\alpha = 0. \quad (4)$$

Определение максимального растягивающего напряжения в пределах II участка основывается на том, что при $\rho = R_1$ (на границе I и II участков очага деформации) напряжение σ_ρ должно быть равно напряжению σ_ρ , определённому по формуле (1), после подстановки в неё значения $\rho = R_1$, увеличенному на величину прироста напряжения $\Delta\sigma_\rho = \sigma_s s / 4R_\rho$, идущего на изгиб заготовки. Кроме того, необходимо учесть составляющую от трения под прижимом $\sigma_{тр} = \mu Q / \pi R_1 s$.

Таким образом, путём интегрирования и дальнейших преобразований было получено уравнение для определения σ_ρ на II-м участке:

$$\sigma_{\rho II} = \beta\sigma_s \left\{ \left(1 + \frac{tg\alpha}{2} \right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{R_1} \right)^{\frac{\mu}{tg\alpha}} \right] + \left(\ln \frac{R_H}{R_1} + \frac{s_0}{2\beta R_\rho} + \frac{Q(\mu_M + \mu_{II})}{2\beta\sigma_s \pi R_H s_0} \right) \left(\frac{\rho}{R_1} \right)^{\frac{\mu}{tg\alpha}} + \frac{\mu Q}{\beta\sigma_s \pi R_1 s_0} \right\} \quad (5)$$

где R_1 – координата верхней границы II – го участка.

III – м участком является зона принудительного утонения, где происходит оформление окончательных размеров поперечного сечения стенки готовой детали. При этом главным параметром в процессе деформации здесь является величина максимального растягивающего напряжения, действующего в стенках протянутой части заготовки. Она может быть определена по методу, описанному в работе [9], из следующих формул при подстановке в них соответствующего усреднённого значения коэффициента трения на поверхности контакта заготовки с матрицей μ_M :

в начале второго этапа деформирования (при наличии фланца под прижимом):

$$\sigma_{Z_1} = 1,15\sigma_{SIII} \left\{ \left[1 + \frac{\mu_M}{\sin\alpha} \left(1 - \frac{\sigma_{\rho II \max}}{1,15\sigma_{SIII}} \right) - \frac{\mu_{II} + \mu_M}{2\sin\alpha} \ln \frac{1}{m_{S_1}} \right] \times \ln \frac{1}{m_{S_1}} + \frac{\sigma_{\rho II \max}}{1,15\sigma_{SIII}} + \frac{\sin\alpha}{2} \right\}; \quad (6)$$

и в конце второго этапа (при $\sigma_{pII} = 0$):

$$\sigma_{ZK} = 1,15\sigma_{SK} \left\{ \left[1 + \frac{2\mu_M - (\mu_{II} + \mu_M) \ln \frac{1}{m_{SK}}}{2 \sin \alpha} \right] \times \ln \frac{1}{m_{SK}} + \frac{\sin \alpha}{2} \right\}, \quad (7)$$

где $\sigma_{pII \max}$ – максимальное растягивающее напряжение на II – м участке;

σ_{sIII} – предел текучести материала с учётом упрочнения на III – м участке;

m_{s1} – коэффициент утонения на первом переходе;

m_{sK} – добавочный коэффициент утонения.

Упрочнение материала в процессе деформирования может быть учтено путём изменения напряжения текучести по степенной зависимости.

Во всех вышеуказанных формулах важное значение имеет усреднённый коэффициент трения на поверхности составной матрицы с перетяжными радиусами из поворотных дисков. Он определяется по формуле, предложенной Г.И. Майоровым. Суть этой формулы заключается в отыскании усреднённого коэффициента путём сопоставления различных коэффициентов трения и относительных длин дуг кольцевых элементов, на которых рассчитывается условно усреднённое значение данных коэффициентов. При этом усреднённый коэффициент трения на перетяжном радиусе матрицы определяется из соотношения:

$$\mu_1^A = \frac{\mu_{подв} l_{подв} + \mu_{неподв} l_{неподв}}{l_{подв} + l_{неподв}}, \quad (8)$$

где $\mu_{подв}, \mu_{неподв}$ – коэффициенты трения соответственно между подвижной и неподвижной частями матрицы и заготовкой;

$l_{подв}, l_{неподв}$ – длины дуг соответственно подвижных и неподвижных элементов матрицы.

Высота деталей, получаемых таким способом, может быть рассчитана по формуле [9]:

$$H_1 = d_1 \left\{ \frac{0,25}{m_s} \left[\frac{1}{m_d^2} - 1 - 2,28 \frac{r_c}{d_1} + 0,56 \left(\frac{r_c}{d_1} \right)^2 \right] + \frac{r_c}{d_1} \right\}, \quad (9)$$

где m_s – коэффициент утонения;

m_d – коэффициент вытяжки;
 d_1 – диаметр детали после первого перехода;
 r_c – радиус закругления у дна.

На основании результатов теоретических исследований была создана программа расчёта основных параметров процесса комбинированной вытяжки в штампе с поворотными дисками. Экспериментальная проверка результатов, полученных с её помощью, показала их высокую точность. В частности, погрешность при определении высоты получаемых деталей ΔH не превысила 5,8 %.

С помощью данной программы были рассмотрены варианты процесса с параметрами, выходящими за пределы возможностей эксперимента. В таблице 1 представлена полученная таким образом зависимость основных параметров от угла конусности матрицы при комбинированной вытяжке в штампе с поворотными дисками.

Таблица 1 – Зависимость основных параметров процесса от угла конусности α (расчёт произведен при следующих исходных данных: материал – алюминий А3, $D_0 = 72$ мм, $s_0 = 1$ мм, $m_{d1} = 0,47$, $m_{s1} = 0,75$, $\sigma_{sIII} = 107,306$ МПа)

$\alpha, ^\circ$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	52
σ_{z1}	109,238	110,986	114,019	117,510	121,040	124,521	127,767	130,733	133,402	134,371
$H_{гран}$	69,956	63,849	59,382	55,714	52,698	50,144	48,028	46,268	44,798	44,288
$m_{d1гран}$	0,455	0,457	0,459	0,460	0,461	0,462	0,463	0,464	0,465	0,465
$m_{s1гран}$	0,455	0,496	0,533	0,568	0,600	0,631	0,658	0,683	0,706	0,714

Из таблицы 1 видно, что при прочих равных условиях с увеличением угла конусности матрицы незначительно увеличивается граничный коэффициент вытяжки, но при этом существенно увеличивается граничный коэффициент утонения. Следовательно, при использовании оптимальных углов конусности матрицы, близких к 15° , появляется возможность достигать значительных степеней утонения заготовки и

получать детали большой относительной высоты даже при умеренном коэффициенте вытяжки.

На рисунке 2 представлен график, построенный по расчётным данным, который иллюстрирует зависимость граничного коэффициента утонения m_s от угла конусности α для цельнометаллической матрицы (сплошная линия) и матрицы с поворотными дисками (пунктирная линия). Исходные данные аналогичны данным для таблицы 1.

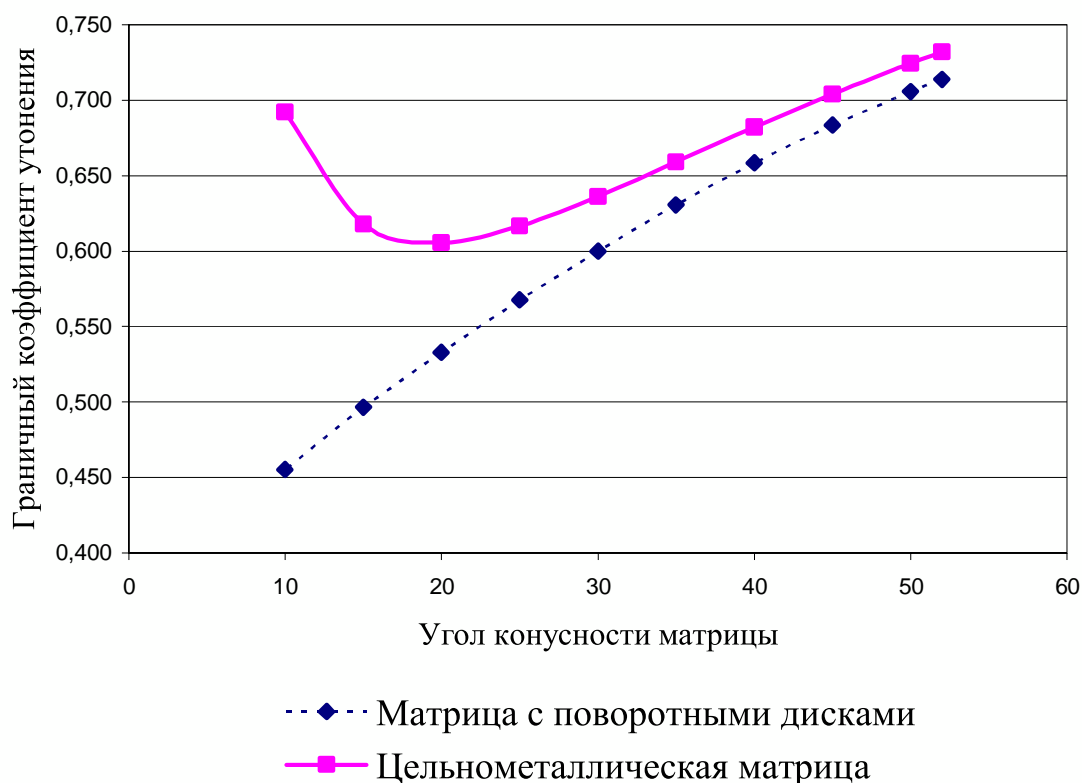


Рисунок 2 – График зависимости граничного коэффициента утонения от угла конусности матрицы

График показывает, что граничный коэффициент утонения при вытяжке в штампе с поворотными дисками значительно меньше того, что может быть достигнуто при использовании классической цельнометаллической матрицы. Следовательно, и граничная степень деформации при использовании поворотных дисков будет большей.

В соответствии с предложенной принципиальной схемой [7] для проведения исследований был специально разработан и изготовлен экспериментальный штамп оригинальной конструкции, представленный на рисунке 3.

При проектировании штампа одним из основных критериев было удобство его использования в условиях имеющегося лабораторного

оборудования. В результате была получена коническая поверхность матрицы с минимально возможным при данных условиях углом конусности $\alpha = 52^\circ$, который существенно отличается от оптимальных углов $\alpha = 10^\circ \div 30^\circ$, рекомендуемых другими авторами [8, 9, 10, 11] для комбинированной вытяжки в зависимости от толщины листового материала и степеней деформации, но позволяет оценить точность теоретически возможной высоты получаемых деталей. Также для получения сравнительных данных была создана матрица с углом конусности $\alpha = 78^\circ$.

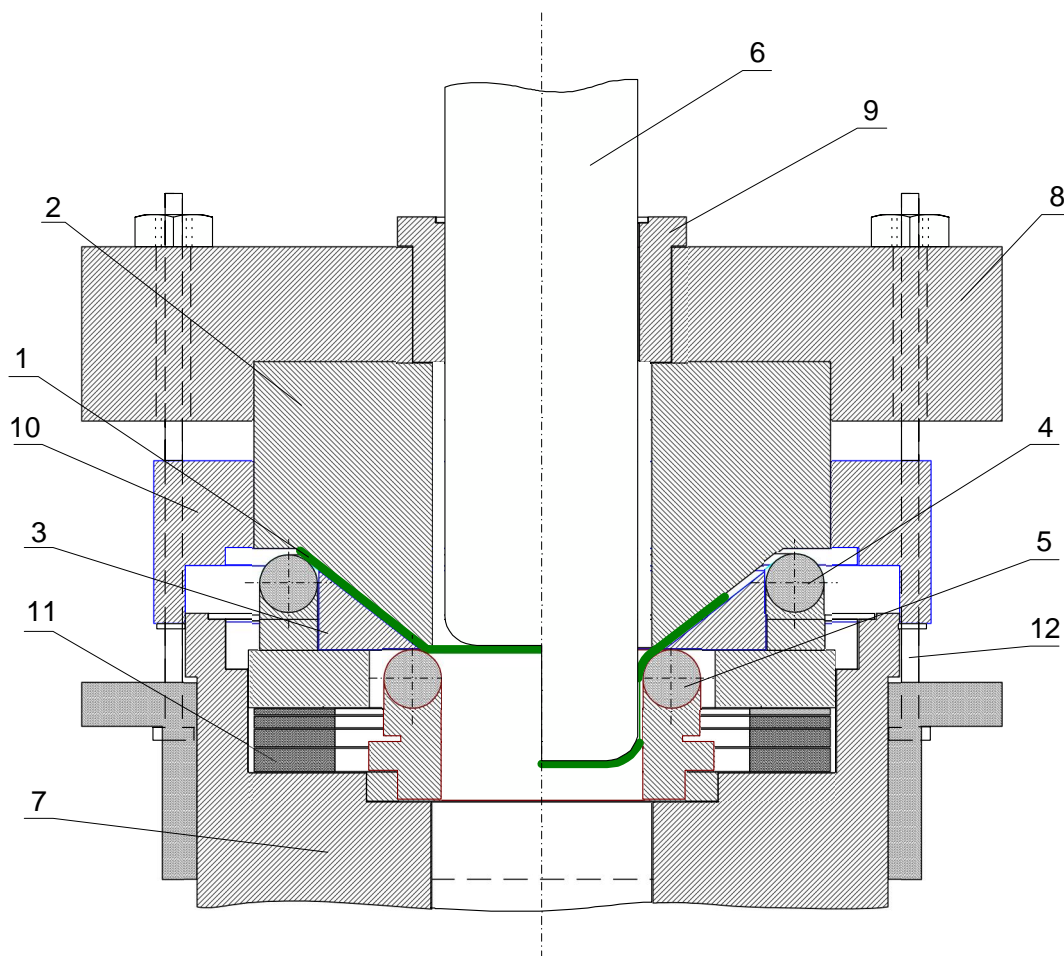


Рисунок 3 – Принципиальная схема экспериментального штампа

В сконструированном штампе плоская заготовка 1 деформируется в два этапа за один ход пресса. Сначала конический прижим 2 втягивает её в соответствующую коническую полость матрицы, сформированную коническим кольцом 3 и верхним 4 и нижним 5 рядами поворотных дисков, где заготовка приобретает промежуточную форму, соответствующую в сечении форме усечённого конуса. Затем на втором этапе деформирования пуансон 6 определённого диаметра, опускаясь, втягивает прижатую заготовку в рабочее отверстие матрицы, обрамлённое

внутренним рядом поворотных дисков, и происходит непосредственно сам процесс получения цилиндрической детали с определённой высотой H , диаметром d_1 и толщиной стенки s_1 .

Рабочие части штампа установлены на основании 7 и фиксируются в нужном положении при помощи верхней плиты 8 с направляющей втулкой 9, прижимного кольца 10, подкладных колец 11 и шпилек 12.

В ходе проведения экспериментальных исследований и обработки полученных данных использовались методы планирования эксперимента, наименьших квадратов, корреляционного и регрессионного анализа.

В результате проведенных экспериментов был выявлен ряд особенностей протекания нового технологического процесса и установлены взаимные зависимости основных его параметров.

Было установлено, что значительное влияние на ход процесса оказывает качество изготовления инструмента. Использование рядов поворотных дисков с величиной зазоров между диском и неповоротным элементом 0,7 мм и величиной относительного смещения диска на оси в пределах 1,2 мм даже при небольших значениях коэффициента утонения $m_{s1} = 0,95 \div 0,9$ приводило к существенному ухудшению качества поверхности – появлению продольных полос и повышению фестонообразования. А при уменьшении коэффициента утонения до значений в пределах $m_{s1} = 0,8 \div 0,75$ наблюдалось также затекание металла в зазоры между дисками, что приводило к возникновению дополнительных радиальных растягивающих напряжений и, как следствие, к отрыву дна, вероятность которого по мере уменьшения m_{s1} увеличивалась.

В то же время использование ряда дисков с зазорами между элементами не более 0,5 мм и незначительной величиной смещения диска на оси ($\approx 0,6$ мм) позволяло производить вытяжку с коэффициентом утонения $m_{s1} = 0,7$ практически без ущерба для качества поверхности детали. Процесс при этом протекал достаточно стабильно.

Установлено также, что определяющее влияние на параметры комбинированной вытяжки по данному методу оказывает усилие и точность приложения нагрузки конического складкодержателя. При недостаточном усилии начинается процесс складкообразования и заготовка теряет устойчивость, а при избыточном величина растягивающих напряжений превышает допустимую и происходит обрыв дна. Перекос конического складкодержателя даже в пределах 1 – 1,5 мм, при общей его ширине 100 мм также ведёт к немедленной потере устойчивости.

В ходе экспериментов выяснилось, что при комбинированной вытяжке по данному способу утонение получают не только стенки, но и дно детали. Данное свойство помогает снизить разнотолщинность готовых изделий и существенно расширяет потенциальные возможности использования комбинированной вытяжки.

Экспериментально установлена возможность использования для комбинированной вытяжки с коэффициентом до 0,5 конических матриц с меньшим диаметром входной кромки рабочего конуса: $D_K = (0,77 \div 0,85)D_0$, в отличие от обычно рекомендуемых параметров $D_K = (0,9 \div 0,95)D_0$.

Кроме того, в результате исследований установлено, что по новому методу может успешно проводиться вытяжка из алюминиевых заготовок с относительной толщиной $S/D = 2,3 \div 2,5$ % и коэффициентом $m_{d1} = 0,52$. При этом, для проведения опытов использовалась та же экспериментальная матрица с углом конусности $\alpha = 52^\circ$.

Важным условием, необходимым для осуществления комбинированной вытяжки является способность металла упрочняться. Эксперименты подтвердили невозможность использования в качестве исходного материала свинца.

Также невозможным оказалось использование для комбинированной вытяжки в штампе с поворотными дисками стальных заготовок. Причина заключается в том, что при деформировании стали, обладающей достаточно высокой прочностью по сравнению с алюминием, давление на диски чрезмерно увеличивается и происходит их заклинивание в обоймах, вследствие чего перетяжной радиус матрицы приобретает свойства цельнометаллического и полезный эффект данного способа вытяжки полностью нивелируется.

К аналогичному результату – заклиниванию дисков – приводили и попытки вытягивать заготовки большой толщины – свыше 1,8 мм.

Таким образом, комбинированная вытяжка с использованием поворотных дисков эффективна лишь для достаточно мягких металлов и сплавов, таких как алюминий, медь латунь и других, и при небольшой толщине материала: для экспериментального штампа предельно допустимая толщина листовых заготовок составила 1,8 мм.

Большую роль при комбинированной вытяжке по предложенной схеме играет смазка. В качестве смазочных материалов желательно использовать синтетические или полусинтетические масла.

Таким образом, принципиальная особенность комбинированной вытяжки в штампе с поворотными дисками – уменьшение силы трения между заготовкой и инструментом – положительно влияет на параметры процесса. Она способствует уменьшению радиальных растягивающих напряжений в материале, что повышает запас прочности опасного сечения, а также даёт возможность достигать больших степеней деформации по толщине заготовки в пределах одного перехода.

В перспективе, после более детального изучения и уточнения всех зависимостей и выработки конкретных рекомендаций по практическому применению комбинированная вытяжка в штампе с поворотными дис-

ками может быть использована для изготовления из относительно пластичных материалов деталей с малой степенью разнотолщинности, например, с одинаковой толщиной стенки и дна, а также в тех случаях, когда наряду с малым коэффициентом вытяжки требуются значительные деформации утонения исходной заготовки за один переход и при этом не нужно высокое качество поверхности.

Представлена схема и принцип работы сконструированного штампа, приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологического процесса.

The scheme and the principle of operation of the designed punch is presented, the results of theoretical and experimental research of technological process are introduced.

Библиографический список

1. Коробко Т.Б., Майоров Г.И., Петрушов С.Н. Анализ начальной стадии процесса глубокой вытяжки в штампе с подвижными дисками // Сб. науч. трудов. – Алчевск, вып. 16, 2002. – С.164 – 168.

2. Майоров Г.И., Коробко Т.Б., Майоров Д.Г. Исследование влияний условий трения на качество вытягиваемых изделий в матрице с поворотными дисками // Сб. науч. трудов. – Алчевск, вып. 17, 2003. – С.309 – 314.

3. Майоров Г.И., Коробко Т.Б. Учёт коэффициента трения при расчёте технологии вытяжки в матрицах с поворотными дисками // Сб. науч. трудов. – Алчевск, вып. 17, 2003. – С.315 – 319.

4. Математическая модель глубокой вытяжки в штампах с поворотными дисками из предварительно гофрированных заготовок / Г.И. Майоров, Т.Б. Коробко, Д.Г. Майоров, Н.Г. Митичкина // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Краматорськ, 2004. – С. 251 – 256.

5. Оценка целесообразности штамповки осесимметричных деталей двойной кривизны в штампе с поворотными дисками / Г.И. Майоров, Т.Б. Коробко, Н.Г. Митичкина, Д.Г. Майоров // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Видавництво СНУ ім. В. Даля. - 2004. – С. 166 – 172.

6. Коробко Т.Б. Совершенствование процессов вытяжки на основе штамповки в матрицах с многосекционными поворотными дисками. Диссертация на соискание учёной степени кандидат технических наук. Краматорск, 2007.

7. Майоров Г.И., Бут А.Ю. Совершенствование процессов комбинированной вытяжки с использованием штампов с поворотными дисками // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. Вып. 26 – Алчевск: ДонГТУ, 2008 – 371 с. С. 211 – 216.

8. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977.

9. Валиев С.А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. М., «Машиностроение», 1973, 176 с.

10. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т./Ред. совет: Е.И. Семёнов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985 – Т. 4. Листовая штамповка/Под ред. Е.И. Семёнова. 1985. 544 с., ил.

11. Сергиенко О.В. Совершенствование процессов комбинированной вытяжки полых цилиндров из листовых заготовок на основе математического моделирования. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук. Луганск, 2002.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Луценко В.А.