

системы в терминах обмена сообщениями между параметризованными объектами.

В код динамических библиотек приложений программы (*.dll-файлов) заложен механизм управления процессом создания типовых конструкций разделительных штампов с помощью методов, работа которых связана с позиционированием деталей и узлов штампа, с выборкой информации из окон интерфейса программы, с изменением размеров и формы объектов и т.д.

Интерфейс программы создан с учетом последовательного прохождения всей процедуры автоматизированного проектирования, а также в соответствии с узловой декомпозицией штампа. Сформированный таким образом интерфейс предполагает снижение длительности проектных процедур ввиду возможности формирования разделительного штампа на уровне типовых механизмов и узлов.

Разработка пользовательских интерфейсов была осуществлена с помощью инструментов приложения NX User Interface Styler (Siemens PLM Software). Интерфейсы окон диалога для этапов проектирования плит штампа, узла направления движения плит штампа, а также транспортных механизмов представлены на рисунке 2.

Интерфейс приложений сформирован с возможностью реализации соответствующего кода программы на основании принципов абстрагирования, инкапсуляции, модульности и иерархии [4].

Таким образом, использование полученных в работе результатов позволяет формализовать базу знаний процесса проектирования последовательных разделительных штампов и разработать алгоритмы их автоматизированного конструирования на основе системного подхода.

На основании полученных отношений между элементами подмножеств выявляются функциональные зависимости, однозначно описывающие параметры последовательного разделительного штампа.

Литература

1. Почекуев Е.Н. Методы автоматизированного проектирования разделительных штампов для холодной листовой штамповки: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» / Е.Н. Почекуев, А.В. Скрипачев, П.Н. Шенбергер. – СПб.: БГТУ «Военмех», 2009. С. 130-133.
2. База графических данных типовых унифицированных пространственных моделей узлов, механизмов и деталей последовательных разделительных штампов вырубки листовой заготовки: заявка на регистрацию № 2011620251, Е.Н. Почекуев, А.В. Скрипачев, П.Н. Шенбергер, 2011.
3. Автоматизированная система для проектирования последовательных разделительных штампов вырубки листовой заготовки: авторское свидетельство РФ, № 2011614118, Е.Н. Почекуев, А.В. Скрипачев, П.Н. Шенбергер, 2011.
4. Троелсен Э. С# и платформа .NET. Библиотека программиста / Э. Троелсен. – СПб.: Питер, 2004. С. 139-195.

Повышение качества изделий при отбортовке круглых отверстий в листовых заготовках и профилях

к.т.н. Калюжный А.В.
НТУУ «КПИ»

7 (044) 4549611, k_OMD@ukr.net

Анотация. Рассмотрен способ отбортовки круглых отверстий в листовых заготовках и профилях, который состоит из операций формообразования отверстия холодным выдавливанием с получением профилированной заготовки, пробивки перемычки и отбортовки. Изделие после отбортовки имеет постоянную толщину стенки и ровную цилиндрическую часть. Инженерным методом получены зави-

симости для определения усилия отбортовки сprofilированной заготовки сферическим пуансоном и размеров исходного профиля. Методом конечных элементов выполнен численный эксперимент отбортовки отверстий в сprofilированной заготовке и отбортовки с утонением. Проведено сравнение результатов расчетов двумя методами

Ключевые слова: отбортовка, традиционная и сprofilированная заготовка, инженерный метод, метод конечных элементов, расчетный анализ

Введение

Отбортовка отверстий в листовых заготовках и профилях – широко распространенная формообразующая операция листовой штамповки. Она также используется для увеличения высоты деталей после вытяжки. Часто детали, полученные отбортовкой, используются для образования разъемных и неразъемных соединений с другими изделиями. При отбортовке отверстий различной конфигурации в традиционной листовой заготовке или профиле имеет место утонение сдеформированной стенки начиная с радиуса закругления матрицы до торца, где величина утонения наибольшая, а также до искривления цилиндрической части изделия. Утонение и искривления приводят к уменьшению качества изделий, которые получены отбортовкой, и снижению надежности и долговечности разъемных и неразъемных соединений отбортованных деталей с другими изделиями.

При проектировании технологами отбортовки расчеты в основном сводятся к определению коэффициента и усилия отбортовки [1-3]. Мало данных об изменении толщины отбортованной части, упрочнении металла после деформации на конечных размерах изделий. Вопросам прогнозирования и обеспечения качества изделий при отбортовке круглых отверстий в традиционной листовой заготовке посвящена работа [4]. Влияние геометрической формы пуансона на качество изделий при отбортовке круглых отверстий рассмотрено в [5]. Для устранения дефектов в виде утонения и искривления стенки был предложен способ отбортовки, сущность которого состоит в отбортовке отверстий в предварительно сprofilированной листовой заготовке или профиле [6]. Профилирование обеспечивает получение утолщения необходимой конфигурации части исходной заготовки, которая подлежит отбортовке. После отбортовки толщина стенки может быть равна или больше толщины исходной заготовки. Утолщение можно получить путем формообразования отверстий выдавливанием или сферодвижной штамповкой. Последовательность операций отбортовки с обеспечением толщины стенки, которая не меньше толщины исходной заготовки, приведена на рисунке 1. На первой операции (рисунок 1а) в заготовке 1, которая установлена на плите 5 и зафиксирована прижимом 3, пуансоном 4 выполняется выдавливание отверстия с образованием перемычки и течением металла в зазор между прижимом. Причем угол боковой поверхности пуансона выбирают таким, чтобы торец изделия после отбортовки был ровным. В результате получена сprofilированная заготовка 2. На второй операции (рисунок 1б) в сprofilированной заготовке, установленной на матрице 2, пуансоном 3 пробивается перемычка 4. Отбортовка сprofilированной заготовки 1, размещенной на матрице 2, при помощи пуансона 3 выполняется на третьей операции (рисунок 1в). В результате получено изделие 4 с толщиной стенки не меньшей толщины исходной заготовки и цилиндрической частью без искривления.

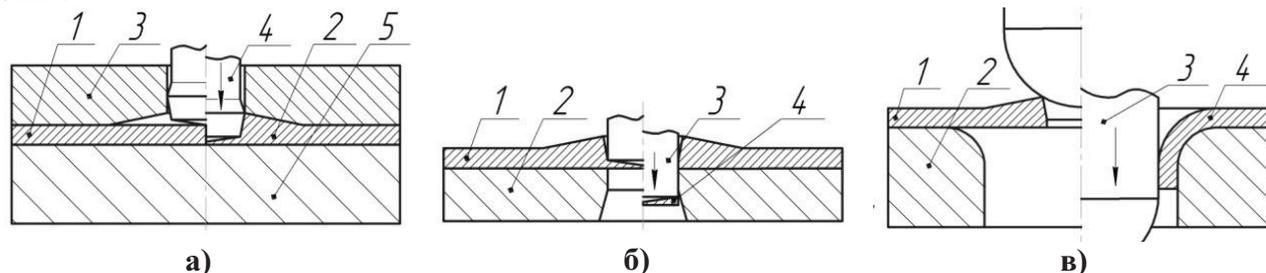


Рисунок 1. Последовательность операций получения отбортовкой изделий с толщиной стенки, которая не меньше толщины исходной заготовки

Преимущества нового способа отбортовки, в сравнении с традиционной заготовкой, рассмотрены в работе [6].

Однако актуальными задачами остаются получение аналитических зависимостей для определения усилия отбортовки сprofilированной заготовки и размеров исходного профиля заготовки, который обеспечивает постоянную толщину стенки после отбортовки, а также установление параметров отбортовки сprofilированной заготовки и отбортовки с утонением. Необходимо выявить качество изделий и выполнить сравнение качества с отбортовкой традиционной заготовки. Показателями качества приняты форма и размеры изделий, упрочнение и степень использования ресурса пластичности металла после деформации.

Постановка задачи

В работе поставлены следующие задачи: проведение теоретического анализа отбортовки сферическим пуансоном круглых отверстий в сprofilированных заготовках инженерным методом (ИМ) с получением аналитических зависимостей для определения напряженного состояния, размеров исходного профиля, который обеспечивает постоянную толщину стенки отбортованной части, и усилия отбортовки; проведение численных экспериментов методом конечных элементов (МКЭ) отбортовки традиционной и сprofilированной листовой заготовки; выполнение сравнения результатов по ИМ и МКЭ.

Результаты исследований

С использованием ИМ проведен анализ отбортовки отверстия сферическим пуансоном в предварительно сprofilированной заготовке. Задача осесимметричная, расчетная схема показана на рисунке 2. Справа от оси приведено исходное состояние. Заготовка 1, установленная на матрице 2, деформируется пуансоном 3. Начальная толщина профиля возле отверстия радиусом r_0 равняется S_n с дальнейшим уменьшением до исходной толщины S_0 на радиусе $R_1 = R_M + r_M$. На заготовке выделен произвольный радиус r_n . Слева от оси показано положение на промежуточной стадии отбортовки при усилии P_0 . На поверхности элементарного объема действуют сжимающие напряжения p от пуансона и касательные напряжения τ , в объеме возникают растягивающие напряжения σ_φ и σ_θ . В этот момент отбортовки радиус r_0 увеличился до r_{om} , а r_n - до R . Используем сферические координаты.

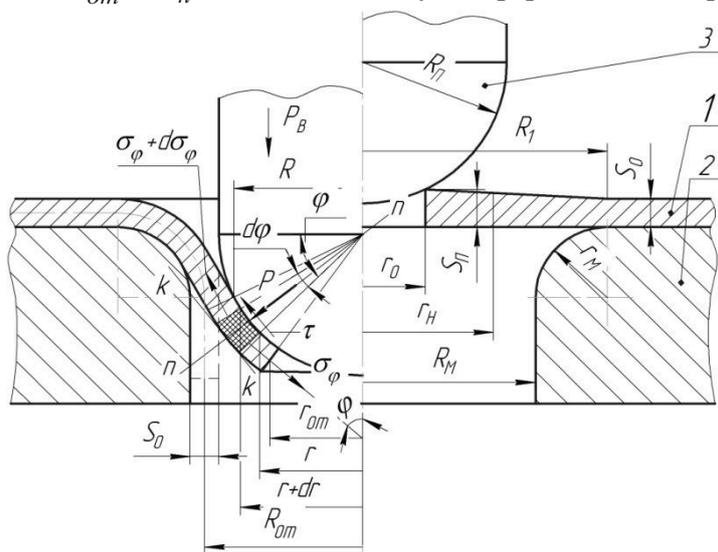


Рисунок 1. Расчетная схема:

1 – заготовка, 2 – матрица, 3 – пуансон

Если записать условия равновесия сил от действующих напряжений на направления k-k и n-n, то получаем два уравнения равновесия:

$$\frac{p}{S} = \frac{\sigma_\varphi}{R_n} + \frac{\sigma_\theta}{R_n}; \quad \frac{d}{dr}(\sigma_\varphi S r) - \sigma_\theta S + \frac{\tau r}{\sin \varphi} = 0. \quad (1)$$

С учетом, что $\tau = \mu p$ (μ - коэффициент трения) и в первом уравнении равновесия $r = R_i \cos \varphi$, подставляя величину p из первого уравнения равновесия во второе, получаем:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_\varphi S r) - \sigma_\theta S - \mu S c t g \varphi (\sigma_\varphi + \sigma_\theta) = 0. \quad (2)$$

Если на данном этапе пренебречь изменением толщины S с учетом приближенного условия пластичности $\sigma_\theta = \sigma_s$ [8], после интегрирования (2) и определения произвольной постоянной из условия при $r = r_{om}$ напряжение $\sigma_\varphi = 0$ имеем:

$$\sigma_\varphi = \sigma_s \frac{1 + \mu c t g \varphi}{1 - \mu c t g \varphi} \left[1 - \left(\frac{r_{om}}{r} \right)^{1 - \mu c t g \varphi} \right]. \quad (3)$$

Максимальная величина напряжения σ_φ^{\max} будет при $r = R_{om}$:

$$\sigma_\varphi^{\max} = \sigma_s \frac{1 + \mu c t g \varphi}{1 - \mu c t g \varphi} \left[1 - \left(\frac{r_{om}}{R_{om}} \right)^{1 - \mu c t g \varphi} \right]. \quad (4)$$

Сделаем замену:

$$\left(r_{om} / R_{om} \right)^{1 - \mu c t g \varphi} = \exp \left[(1 - \mu c t g \varphi) \ln (r_{om} / R_{om}) \right] \approx 1 - (1 - \mu c t g \varphi) \ln (R_{om} / r_{om}). \quad (5)$$

Тогда из (4) получаем:

$$\sigma_\varphi^{\max} = \sigma_s (1 + \mu c t g \varphi) \ln \left(\frac{R_{om}}{r_{om}} \right). \quad (6)$$

Для определения размеров исходного профиля заготовки S_n , который обеспечит постоянную толщину стенки после отбортовки проведено решение без влияния сил трения. Тогда из уравнения (2) аналогично получаем:

$$\sigma_\varphi^{\max} = \sigma_s \left(1 - \frac{r_{om}}{R_{om}} \right). \quad (7)$$

Тогда, используя решения Е.А. Попова для отбортовки отверстий плоским пуансоном, можно получить выражения для определения изменения толщины S при отбортовке сprofilированной заготовки:

$$S = S_n \left(\frac{r_n}{R} \right)^{\frac{\sigma_\theta + \sigma_\varphi}{2\sigma_\theta - \sigma_\varphi}} \quad \text{или} \quad S = S_n \left(\frac{r_n}{R} \right)^{\frac{2r_n - r_o}{r_n + r_o}}. \quad (8)$$

Если во втором выражении в (8) вместо r_n подставить r_o , а радиус R заменить на R_{om} , то получим формулы для определения высоты профиля S_n , которая обеспечит постоянную толщину отбортованной стенки, и изменения толщины S при отбортовке:

$$S_n = \frac{S_o}{\sqrt{r_o / R_{om}}} \quad \text{и} \quad S = \frac{S_o}{\sqrt{r_o / R_{om}}} \left(\frac{r_n}{R} \right)^{\frac{2r_n - r_o}{r_n + r_o}}. \quad (9)$$

Для приближенного учета упрочнения при отбортовке сprofilированной заготовки используем решение Попова Е.А. для отбортовки традиционной заготовки [8], которое позволяет определить радиус отверстия r_{om} , обеспечивающий экстремальное значение напряжению σ_φ^{\max} . В принятых обозначениях имеем:

$$r_{om} = r_o + \psi_{ш} (R_{om} - r_o). \quad (10)$$

В уравнении (5) $\psi_{ш}$ - относительное сужение, соответствующее образованию шейки в образце при испытании на растяжение. Тогда экстремальное значение σ_φ^{\max} для нашего слу-

чая из (6) имеет вид:

$$\sigma_{\varphi}^{\max} = \sigma_s (1 + \mu \operatorname{ctg} \varphi) \ln \left[\frac{R_{om}}{r_o + \psi_{uu} (R_{om} - r_o)} \right]. \quad (11)$$

По напряжению из (11) можно определить максимальное значение усилия отбортовки P_{ε} с использованием степенной аппроксимации диаграммы истинных напряжений для нахождения величины σ_s [8]:

$$\sigma_s = \sigma_{\varepsilon} \left(\frac{R_{om} - r_o}{2r_o} \right)^{\frac{1 - \psi_{uu}}{\psi_{uu}}}. \quad (12)$$

В (12) σ_{ε} - предел прочности. Формула для определения усилия, с учетом проекции напряжения σ_{φ}^{\max} , имеет вид:

$$P_{\varepsilon} = 2\pi R_{om} S_o \sigma_{\varphi}^{\max} / \cos \varphi. \quad (13)$$

Подставляем в (13) выражения для σ_{φ}^{\max} из (11) и σ_s из (12):

$$P_{\varepsilon} = 2\pi R_{om} S_o \sigma_{\varepsilon} \left(\frac{R_{om} - r_o}{2r_o} \right)^{\frac{1 - \psi_{uu}}{\psi_{uu}}} \frac{(1 + \mu \operatorname{ctg} \varphi)}{\cos \varphi} \ln \left[\frac{R_{om}}{r_o + \psi_{uu} (R_{om} - r_o)} \right]. \quad (14)$$

Величину $\cos \varphi$ можно приблизительно определить из геометрических соотношений по расчетной схеме:

$$\cos \varphi \approx \frac{r_{om}}{R_n} = \frac{r_o}{R_n} + \psi_{uu} \left(\frac{R_{om}}{R_n} - \frac{r_o}{R_n} \right). \quad (15)$$

Для проверки адекватности решения ИМ проведен численный эксперимент отбортовки спрофилированной заготовки с использованием МКЭ и лицензированной программы DEFORM. На рисунке 2 приведена расчетная схема, Спрофилированная листовая заготовка 1 из малоуглеродистой стали толщиной $S_o = 3$ мм и отверстием радиусом $r_o = 13,45$ мм установлена на матрице 2, которая имеет радиусы отверстия $R_m = 35$ мм и закругления $r_m = 10$ мм, и фиксируется прижимом 3. Отбортовка выполняется сферическим пуансоном 4 радиусом $R_n = 32$ мм. Моделированием МКЭ определены форма и размеры профиля, который обеспечит постоянную толщину отбортованной стенки: толщина $S_n = 4,8$ мм с уменьшением до S_o на радиусе $R_1 = R_m + r_m = 45$ мм. В скобках приведен размер $S_n = 4,75$ мм, который получен по формуле (9). На рисунке 3 приведена зависимость усилия отбортовки от перемещения пуансона, полученная МКЭ и приведено максимальное значение усилия, рассчитанное ИМ по формуле (14). Различие в величинах составляет 10 %.

Отбортовка традиционной заготовки приводит к утонению стенки с 3 мм до 1,84 мм и искривлению, которое составляет 1,16 мм. Предварительно спрофилированная заготовка обеспечивает постоянную толщину 3 мм отбортованной части без искривления.

Был также проведен МКЭ сравнительный расчетный анализ отбортовки с дальнейшим утонением стенки в заготовках из малоуглеродистой стали с размерами инструмента и заготовок: $R_m = 21,5$ мм, $r_m = 7$ мм, $R_n = 20,5$ мм, $r_n = 10$ мм, $S_o = 1,5$ мм, $S_n = 2,2$ мм, $R_1 = 21$ мм, $r_o = 10$ мм. На рисунке 5 приведены форма и размеры заготовок после отбортовки с утонением стенки (односторонний зазор между пуансоном и матрицей был 1 мм). Выявлено, что утонение стенки после отбортовки спрофилированной заготовки позволяет получать на 15 % больше высоту отбортованной части по сравнению с традиционной заготовкой. Кроме того, утонение стенок после отбортовки спрофилированной заготовки приводит к более интенсивной проработке структуры металла холодной пластической деформацией.

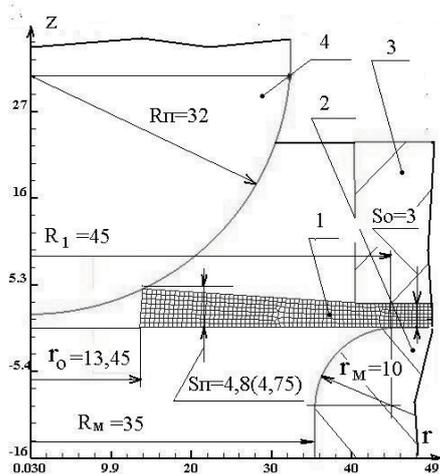


Рисунок 2. Расчетная схема для анализа МСЭ. Размеры в миллиметрах.

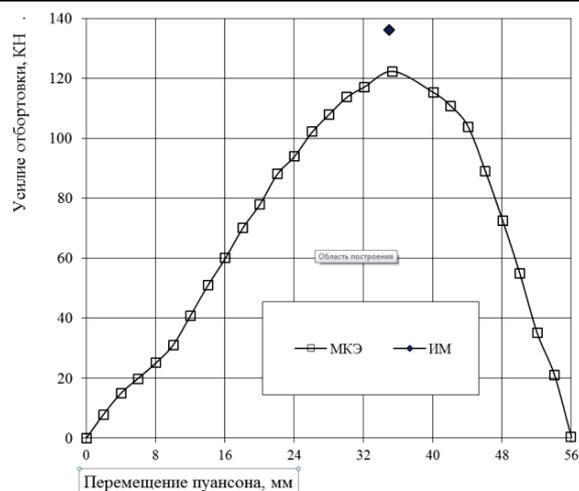


Рисунок 3. Зависимости усилия от перемещения пуансона, полученные по МКЭ и ИМ.

На рисунке 4 приведены форма и размеры (L) сдеформированной части изделий, полученных отбортовкой традиционной (а) и спрофилированной (б) заготовок.

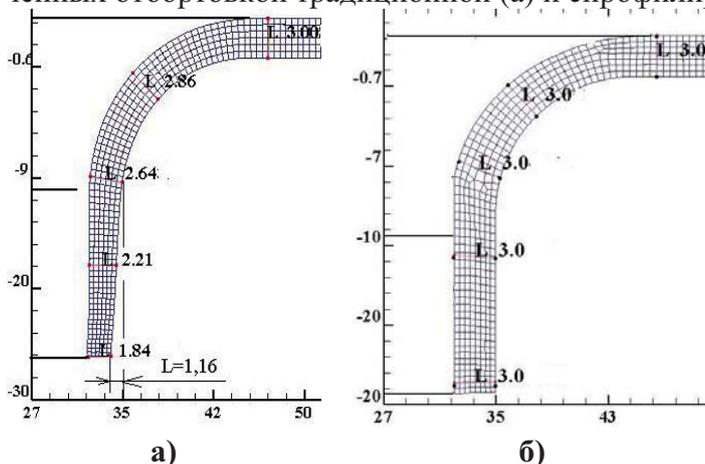


Рисунок 4. Форма и размеры отбортованной части: а- традиционная заготовка, б - спрофилированная заготовка (размеры в миллиметрах)

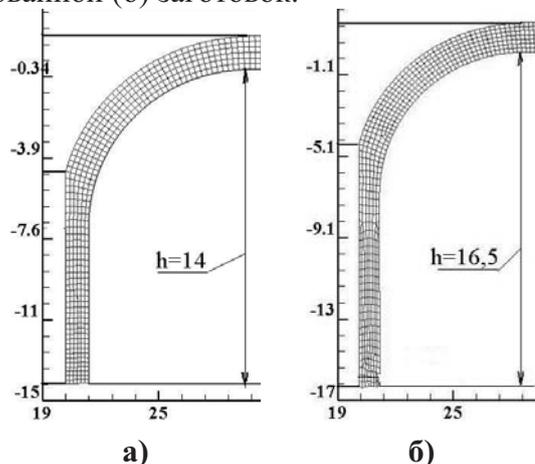


Рисунок 5. Размеры (в миллиметрах) заготовок после отбортовки и утонения: а- традиционная заготовка, б- спрофилированная заготовка

Выводы

1. Предложен способ отбортовки отверстий в спрофилированной заготовке, который обеспечивает постоянную толщину стенки изделия и экономию металла при образовании отверстий. Сущность способа состоит в образовании отверстий выдавливанием с получением профилированной заготовки и последующими пробивкой перемычки и отбортовки.

2. Инженерным методом получены аналитические зависимости для определения напряжений, усилия отбортовки и размеров исходного профиля, который обеспечивает постоянную толщину стенки отбортованной части.

3. Методом конечных элементов проведен сравнительный анализ отбортовки отверстий в традиционной и спрофилированной заготовках. Результаты моделирования позволят использовать зависимости для инженерных расчетов параметров отбортовки спрофилированной заготовки.

4. Показаны преимущества отбортовки спрофилированной заготовки, которая позволяет получать в изделии постоянную толщину стенки без искривлений и большую высоту стенки при отбортовке с утонением.

Литература

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / – 6-е изд., пераб. и доп. // В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка// Ю.А.Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. - 288 с.
3. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка/ Под ред.. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985-1987. – 544 с.
4. Калюжный А.В. Прогнозирование та обеспечение качества изделий в процессах отбортовки / А.В. Калюжный // Вестник Национального технического университета «ХПИ». - Харьков; 32'2009 г. - С. 118 — 122.
5. Калюжный А.В. Анализ силовых режимов и качества изделий при отбортовке пуансонами различной геометрической формы / А.В. Калюжный, С.М. Пахолко// Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение, № 63, 2011. - С. 123-127.
6. Патент 69344 Украина, МПК(2012) B21D 26/02. Способ отбортовки отверстий / Калюжный А.В., Пахолко С.А., Куликов. И.П., № u201112215; Заявл. 18.10.2011, опубл.25.04.2012, Бюл. №8/2012.
7. Калюжный А.В. Влияние коэффициента отбортовки на силовые режимы и качество изделий при отбортовке круглых отверстий в традиционной и спрофилированной листовой заготовке // А.В. Калюжный// Вестник Национального технического университета «ХПИ», № 46, 2012. - С. 56-63.
8. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. - М: Машиностроение, 1977. – 278 с.

Определение деформации слоев при осесимметричной формовке двухслойной заготовки

к.т.н. доц. Типалин С.А., к.т.н. проф. Шпунькин Н.Ф., Косачев Н.В.
Университет машиностроения
(495) 223-05-23 доб. 1113, ti@mami.ru

Анотация. Проведено экспериментальное исследования осесимметричной формовки двухслойной заготовки с упруговязким соединительным слоем. Получено распределение утонения слоев в радиальной направлении. Выявлено, что характер распределения утонения наружного и внутренних слоев по сечению заготовки значительно отличаются между собой.

Ключевые слова: двухслойный материал, деформация слоев, утонение, осесимметричная формовка

В настоящее время улучшение эксплуатационных показателей продукции тесно взаимосвязано с применением новых материалов и технологий их последующей обработки, что в свою очередь непосредственно оказывает влияние на развитие инновационной экономики России [1]. Перспективными материалами, применения которых в промышленности постоянно возрастает, являются многослойные листовые материалы, совмещающие в себе чередующиеся слои металлов и полимеров. Распространение таких материалов обусловлено тем, что, в зависимости от вида используемых материалов слоев и последовательности их расположения в пакете, многослойный лист может сочетать в себе основные преимущества каждого слоя. Детали из такого материала не уступают по прочности, твердости и жесткости деталям из традиционных (монокромных) материалов и имеют меньший вес, обладают способностью гасить вибрационные и звуковые колебания, являются хорошими изоляторами теплового воздействия и агрессивных сред.

В результате перечисленных преимуществ многослойные материалы находят широкое применение в автомобилестроении, авиастроении, строительстве, химической промышленности, производстве товаров народного потребления.