

ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGS

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-6-493-503
УДК 672.32

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Силовые параметры деформирования металла при листовой вытяжке

Ю.А. Морозов

МИРЭА – Российский технологический университет, Российская Федерация, 107996, Москва, ул. Стромынка, д. 20
akafest@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 августа 2020 г.
Доработана: 25 октября 2020 г.
Принята к публикации: 12 ноября 2020 г.

Аннотация

Цель исследования состояла в изучении влияния кривизны скругления торцовых поверхностей при формообразовании цилиндрического изделия (стакана) с учетом пластического утонения деформируемого материала на торцевых кромках матрицы и давящего пуансона. *Методы.* Проанализирована существующая схема определения силовых параметров листовой вытяжки, основанная на допущении реализации в материале некоего абстрактного напряженного состояния, главным образом – условного предела прочности. При этом возможность формообразования изделия без разрушения демонстрирует очевидную завышенность уровня напряжений. Разработана математическая модель объемного напряженного состояния металла, позволяющая оценить деформационное и напряженное состояния при формообразовании холодновытянутого изделия, то есть рассмотрены сворачивание листовой заготовки по торцевому радиусу скругления давящего пуансона и установившийся процесс втягивания заготовки в очаг деформации с последовательным изгибом/спрямлением материала по ребру матрицы. Выявлен уровень радиальных напряжений при сворачивании и растягивании листового материала с учетом его деформационного упрочнения и утонения, определяющих усилие формообразования. Полученные *результаты* найдут применение в моделировании напряженно-деформированного состояния металла при разработке технологии листовой вытяжки для вычисления величины утонения, оценки уровня радиальных напряжений формообразования скруглений торцовых поверхностей по торцевым кромкам матрицы и давящего пуансона, а также расчета силовых параметров формообразования, что позволит предупредить разрушение вытягиваемой детали, гарантируя получение качественной продукции, и точнее подойти к выбору деформирующего оборудования.

Ключевые слова: вытяжка, нейтральное сечение, утонение, радиус кривизны, радиальная деформация, тангенциальная деформация, радиальное напряжение

Для цитирования

Морозов Ю.А. Силовые параметры деформирования металла при листовой вытяжке // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 6. С. 493–503. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-493-503>

Морозов Юрий Анатольевич, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 3189-5426, Scopus Author ID: ID: 24475032700, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9229-7398>

© Морозов Ю.А., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Force parameters of metal deformation during sheet drawing

Yury A. Morozov

MIREA – Russian Technological University, 20 Stromynka St, Moscow, 107996, Russian Federation
akafest@mail.ru

Article history

Received: August 12, 2020

Revised: October 25, 2020

Accepted: November 12, 2020

Abstract

The aim of the work. The effect of the curvature of the rounding of torus surfaces during the formation of a cylindrical product (glass) is investigated, taking into account the plastic thinning of the deformable material at the end edges of the matrix and pressing punch. *Methods.* The existing scheme for determining the power parameters of sheet drawing is analyzed, based on the assumption of the implementation of some abstract stress state in the material; mainly conditional tensile strength. At the same time, the possibility of forming the product without destruction determines the obvious overestimation of the stress level. A mathematical model of the volumetric stress state of the metal is being developed, which makes it possible to assess the deformation and stress state during the formation of a cold-drawn product, i. e. the folding of the sheet blank along the end radius of the rounding of the pressing punch and the steady-state process of drawing the blank into the deformation zone with successive bending/straightening of the material along the edge of the matrix are considered. The level of radial stresses during folding and stretching of sheet material is estimated, taking into account its strain hardening and thinning, which determine the forming force. The obtained results will make it possible to simulate the stress-strain state of the metal during the development of sheet drawing technology: to establish the amount of thinning, to estimate the level of radial stresses in the formation of rounding of torus surfaces along the end edges of the matrix and the pressing punch, as well as to determine the power parameters of the formation, which will prevent the destruction of the pulled part, guaranteeing obtaining high-quality products and more accurately choosing the deforming equipment.

Keywords: hood, neutral cross section, thinning, radius of curvature, radial deformation, tangential deformation, radial stress

For citation

Morozov Yu.A. Force parameters of metal deformation during sheet drawing. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(6):493–503. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-493-503>

1. Введение

Объектом исследования является процесс листовой вытяжки, обеспечивающий сворачивание пространственного изделия из плоской листовой заготовки.

Подобная технологическая операция применяется при изготовлении широкого спектра продукции, как бытового, так и промышленного назначения – авиа-, автомобилестроение, сельхозмашиностроение и пр. Популярность данного процесса можно объяснить сравнительно простым способом формообразования готовой заготовки в виде листа металла, при этом получаемые изделия имеют высокие прочностные эксплуатационные свойства и малый вес.

Данному процессу посвящено достаточное количество работ, которые можно разделить на две группы. Большая часть работ связана с уточнением и оптимизацией технологии листовой вытяжки, а также моделированием напряженно-деформированного состояния металла при формообразовании детали [1–11]. Значительно меньший объем работ посвящен исследованию предельных напряжений и разрушению металла [12–15].

Однако, несмотря на простую схему формообразования, профильной литературой рекомендуется весьма приближенный метод определения силы вытяжки, сводящийся к единственному известному параметру – площади поперечного сечения пространственного изделия F , находящейся под действием не-

кого абстрактного механического напряжения, за которое в основном принимается условный предел прочности деформируемого материала σ_B (рис. 1).

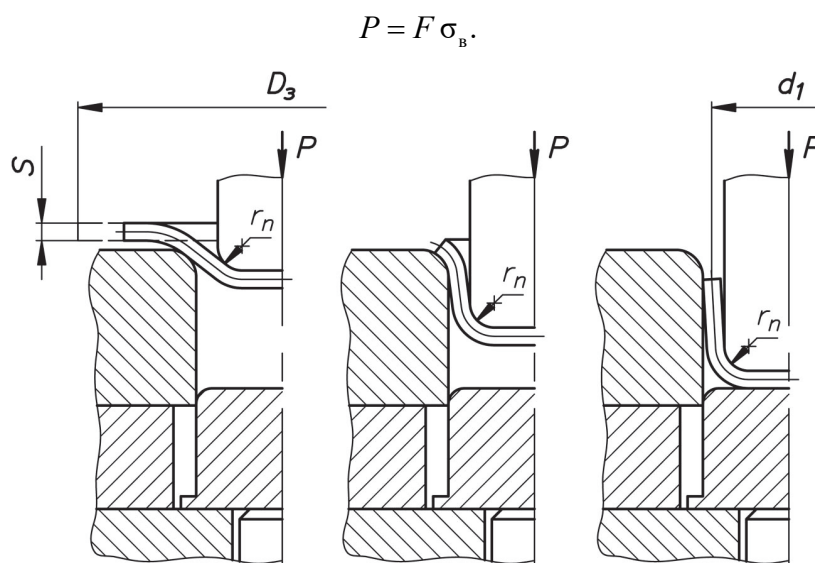


Рис. 1. Схема вытяжки
[Figure 1. Schematic drawing]

Принимая во внимание, что предел прочности устанавливает наибольшее напряжение, которое способен выдержать материал под нагрузкой без разрушения (разрыва), становятся очевидными завышенные силовые параметры формообразования. Этим объясняется различие практических и теоретических значений усилий вытяжки, т. к. при правильно рассчитанных размерах полуфабриката, фактические напряжения в его стенках *никогда* не превысят предела прочности материала [16; 17].

Следует отметить, что силовые параметры определяют не только технологию изготовления, но и существенно влияют на выбор деформирующего оборудования, что, несомненно, обуславливает актуальность работы.

Коррекция силовых параметров с определенной долей вероятности допускается дополнительным эмпирическим коэффициентом, обратно пропорциональным коэффициенту вытяжки

$$P = F \sigma_B k_{вт} = \pi d_1 S \sigma_B k_{вт},$$

где F – площадь кольцевого элемента полуфабриката, определяемая периметром и толщиной стенки цилиндрического изделия

$$F = \pi d_1 S; \tag{1}$$

d_1 – диаметр вытягиваемой детали (по срединной линии); S – толщина материала; $k_{вт}$ – коэффициент, зависящий от коэффициента вытяжки (см. таблицу) [18].

Таблица

Поправочный коэффициент $k_{вт}$
[Table. Correction factor $k_{вт}$]

Коэффициент вытяжки, m [Drawing ratio, m]	$k_{вт}$	Коэффициент вытяжки, m [Drawing ratio, m]	$k_{вт}$	Коэффициент вытяжки, m [Drawing ratio, m]	$k_{вт}$
До 0,55	1,00	Св. 0,63 до 0,65	0,72	Св. 0,73 до 0,75	0,50
Св. 0,55 до 0,58	0,93	» 0,65 » 0,68	0,66	» 0,75 » 0,78	0,45
» 0,58 » 0,60	0,86	» 0,68 » 0,70	0,60	» 0,78 » 0,80	0,40
» 0,60 » 0,63	0,79	» 0,70 » 0,73	0,55	» 0,80	0,37

При этом не учитываются параллельно протекающие процессы деформационного упрочнения, повышающего механические свойства материала с одновременным утонением, также приводящим к увеличению напряжения в материале и являющимся причиной разрушения детали. Поэтому, несмотря на простую схему вытяжки листовой заготовки, определение силовых параметров следует проводить параллельно с исследованием напряженно-деформированного состояния материала при пластическом формообразовании торцовых поверхностей скругления детали, обусловленных конфигурацией деформирующего инструмента [19–21].

Рассматривая процесс листовой вытяжки, можно отметить два основных фактора, характеризующих последовательность формообразования детали:

- начальный период сворачивания листовой заготовки торцевым радиусом давящего пуансона;
- установившийся процесс втягивания заготовки в очаг деформации, сопровождающийся последовательным изгибом/спрямлением материала по ребру матрицы.

В связи с этим перечень решаемых задач будет включать определение деформированного состояния материала в зависимости от создаваемой кривизны детали и установление радиальных напряжений с учетом упрочнения материала при формообразовании; определение площади поперечного сечения пространственной тонкостенной детали в месте наиболее прогрессирующего утонения и расчет усилия формообразования материала по давящему инструменту.

2. Математическая постановка задачи

Радиальные напряжения при сворачивании и растягивании листового материала по торцевой кромке инструмента

$$\sigma_{\rho_{\max}} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} S e^{f \frac{\pi}{2}}, \quad (2)$$

где σ_T – сопротивление пластической деформации; ρ_n – радиус нейтральной поверхности, разделяющей растянутые и сжатые слои материала при изгибе листовой заготовки; f – коэффициент контактного трения.

С использованием деформационной модели изменения наружного и внутреннего радиусов

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{нар}} &= R_1 + (R_1 - \rho_n) \varepsilon_{r_{\text{нар}}} \\ R_{\text{вн}} &= R_2 + (\rho_n - R_2) \varepsilon_{r_{\text{вн}}} \end{aligned} \right\}$$

устанавливаются радиальные деформации уменьшения наружного радиуса $R_1 \rightarrow R_{\text{нар}}$ и увеличения внутреннего радиуса $R_2 \rightarrow R_{\text{вн}}$ (рис. 2):

$$\varepsilon_{r_{\text{нар}}} = \frac{R_{\text{нар}} - R_1}{R_1 - \rho_n} < 0 \quad \text{и} \quad \varepsilon_{r_{\text{вн}}} = \frac{R_{\text{вн}} - R_2}{\rho_n - R_2} > 0.$$

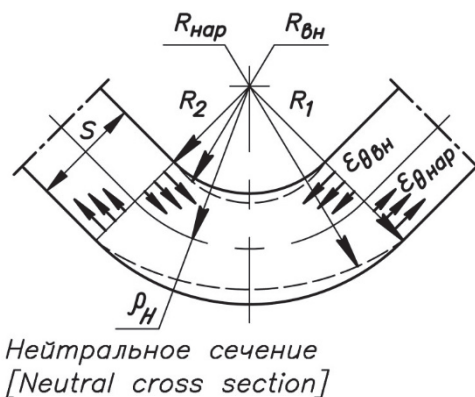


Рис. 2. Распределение тангенциальных деформаций по сечению полосы
[Figure 2. Distribution of tangential strain on the cross section of the strip]

Тангенциальная деформация, приводящая к изменению толщины растянутых и сжатых слоев материала, устанавливается согласно условию постоянства объема

$$\varepsilon_{\theta \text{ нар}} = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - 1 \text{ и } \varepsilon_{\theta \text{ вн}} = \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} - 1.$$

В окончательном виде выражения для определения наружного и внутреннего радиусов изогнутого элемента [22; 23] имеют вид

$$\left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} \right)^2 \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - 1 \right) = \frac{R_1}{R_2} Z - 1; \tag{3a}$$

$$\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \left(\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} + 1 - 2Z \right) \left(2 - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \right) = 1 - Z, \tag{3б}$$

где $Z = R_2 / \rho_n$ – коэффициент, определяющий радиус нейтральной поверхности, вычисляемый из условия равновесия изгибающих моментов в растянутых и сжатых слоях заготовки, возникающих под влиянием тангенциальных напряжений относительно нейтральной поверхности (рис. 3)

$$M_{\text{нар}} = \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - 1 \right)^2 \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} + 1 \right) = \left(1 - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \right)^2 \left(1 + \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \right) = M_{\text{вн}}.$$

Использование регрессионного анализа устанавливает логарифмическую зависимость, обеспечивающую наилучшую сходимость с приведенным графиком с ошибкой менее 1 %:

$$Z = \frac{R_2}{\rho_n} = -0,433 \ln \frac{R_1}{R_2} + 0,995. \tag{4}$$

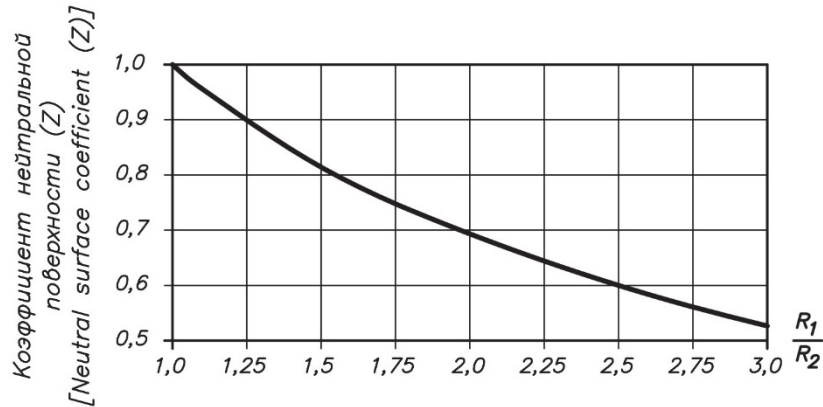


Рис. 3. Коэффициент нейтральной поверхности, Z
[Figure 3. Neutral surface coefficient, Z]

3. Анализ результатов исследования

Рассмотрим в качестве примера осесимметричный цилиндрический стакан наружным диаметром $d_{\text{ст}} = 80$ мм, толщиной стенки $S = 3,0$ мм, деформируемый пуансоном с торцевым радиусом $r_n = 20$ мм. Перетягивание металла в очаг деформации происходит по ребру матрицы радиусом $r_m = 11$ мм.

Сразу следует отметить, что проведенный эксперимент вытяжки трех подобных стаканов из алюминиевого сплава АМг1 показал усилие деформирования 7,3...7,5 т (рис. 4).

Рассмотрим последовательно силовые факторы формообразования данной вытяжки, имеющей диаметр по срединной линии

$$d_1 = d_{\text{ст}} - S = 80 - 3,0 = 77 \text{ мм.}$$



Рис. 4. Эксперимент вытяжки цилиндрических стаканов
[**Figure 4.** The experiment of extracting cylindrical glasses]

3.1. Начальный период сворачивания листовой заготовки торцевым радиусом давящего пуансона

Формообразование торового радиуса скругления осуществляется торцевым радиусом давящего пуансона $r_n = R_2 = 20$ мм, определяющим отношение радиусов кривизны

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_n + S}{r_n} = \frac{20 + 3,0}{20} = 1,15.$$

Коэффициент нейтральной поверхности (4)

$$Z = \frac{r_n}{\rho_n} = -0,433 \ln \frac{R_1}{R_2} + 0,995 = -0,433 \ln 1,15 + 0,995 = 0,934.$$

Соответственно, продеформированные наружный и внутренний радиусы торовой поверхности изогнутого элемента (3)

$$\left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n}\right)^2 \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - 1\right) = \frac{R_1}{R_2} Z - 1 = 1,3 \cdot 0,934 - 1 = 0,0741;$$

$$\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \left(\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} + 1 - 2Z\right) \left(2 - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n}\right) = 1 - Z = 1 - 0,934 = 0,066.$$

Методом итерации устанавливаются

$$R_{\text{нар}}/\rho_n = 1,0653 \text{ и } R_{\text{вн}}/\rho_n = 0,9343.$$

Радиус нейтральной поверхности

$$\rho_n = r_n/Z = 20/0,934 = 21,41 \text{ мм.}$$

При этом не следует пренебрегать возникающим здесь утонением материала, вызванным растягивающими напряжениями. Кроме того, некорректно будет использовать в качестве расчетного сечения диаметр вытягиваемой детали (сечение А), так как разрушение материала начинается в донной части, являющейся локализацией наиболее прогрессирующего утонения (сечение Б), рис. 5.

Принимая во внимание формообразование детали по фиксированному внутреннему радиусу $R_{\text{вн}}/\rho_n = \text{const}$, обусловленному торцевым радиусом скругления давящего пуансона $r_n = R_2 = R_{\text{вн}}$, устанавливается толщина торовой поверхности после деформирования

$$S' = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} \rho_n - r_n = 1,0653 \cdot 21,41 - 20 = 2,81 \text{ мм.}$$

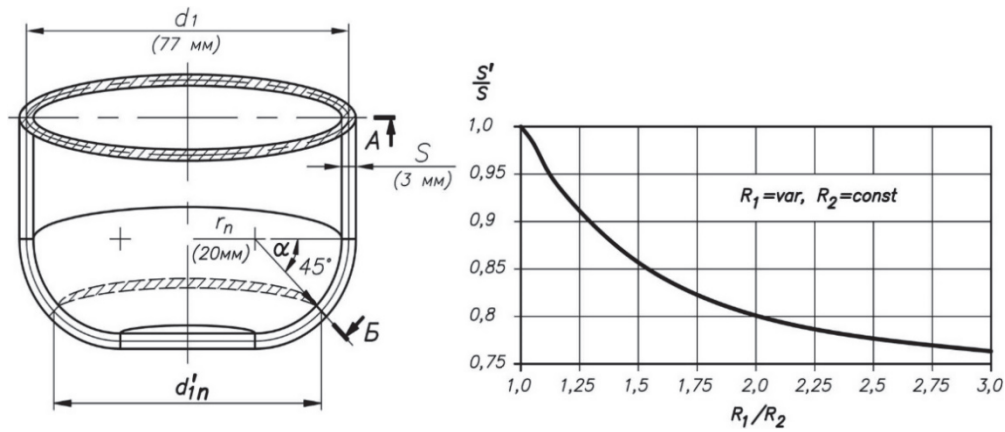


Рис. 5. Формообразование детали и утонение листового металла при вытяжке
 [Figure 5. Forming a part and thinning a sheet metal during drawing]

Коэффициент утонения, обусловленный торцевым радиусом скругления кромки давящего пуансона, то есть интенсивностью деформаций сжатых и растянутых слоев материала относительно нейтрального сечения:

$$S'/S = 2,81/3,0 = 0,937.$$

Приближенное значение коэффициента утонения с погрешностью не более 2 % также можно определить, используя аппроксимационную полиномиальную математическую модель (рис. 5) [24]:

$$\frac{S'}{S} = -0,05 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 + 0,38 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 - 0,985 \frac{R_1}{R_2} + 1,65.$$

При допущении наиболее прогрессирующего утонения, геометрически расположенного под углом $\alpha = 45^\circ$ относительно образующего радиуса кривизны пуансона, определяется средний диаметр торовой поверхности скругления в опасном сечении Б:

$$d'_{1n} = d_1 - 2(1 - \cos \alpha) r_n \approx d_1 - 0,586 r_n = 77 - 0,586 \cdot 21,41 = 64,45 \text{ мм.}$$

Площадь соответствующего поперечного кольцевого сечения (1)

$$F' = \pi d'_{1n} S \frac{S'}{S} = \pi 64,45 \cdot 3,0 \cdot 0,937 = 569,2 \text{ мм}^2.$$

Деформация формоизменения, характеризующая упрочнение материала и определяемая суммарным значением тангенциальных деформаций на наружной и внутренней поверхностях, сворачиваемой торовой поверхности стакана [25]

$$\varepsilon = \varepsilon_{\theta \text{ нар}} + \varepsilon_{\theta \text{ вн}} = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} = 1,0653 - 0,9343 = 0,131 \text{ (13,1 \%)}.$$

С использованием коэффициента трения «алюминий – сталь» (без смазки) $f = 0,28$, устанавливается радиальное напряжение в материале при формообразовании скругления торовой поверхности стакана (4)

$$\sigma_{p \text{ max}} = \frac{\sigma_T}{2 \rho_n} \frac{S}{S'/S} e^{f \frac{\pi}{2}} = \frac{156,3}{2 \cdot 21,41} \frac{3,0}{0,937} e^{0,28 \frac{\pi}{2}} = 18,1 \text{ МПа,}$$

где σ_T – сопротивление пластической деформации алюминиевого сплава АМг1 с условным пределом текучести $\sigma_{0,2} = 98,1$ МПа, определяемое эмпирической зависимостью

$$\sigma_T = \sigma_{0,2} + 12,75 \varepsilon^{0,59} = 98,1 + 12,75 \cdot 13,1^{0,59} = 156,3 \text{ МПа.}$$

Таким образом, усилие формообразования материала по торцевому радиусу скругления давящего пуансона

$$P_n = F' \sigma_{\rho_{\max}} = 569,2 \cdot 18,1 = 10302,5 \text{ Н (1,05 т)}.$$

3.2. Установившийся процесс вытягивания заготовки в очаг деформации, сопровождающийся последовательным изгибом/спрямлением материала по ребру матрицы

Формообразование детали в установившемся процессе вытягивания заготовки в очаг деформации определяется радиусом ребра матрицы $r_m = R_2 = 11$ мм, устанавливающим отношение радиусов кривизны

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_m + S}{r_m} = \frac{11 + 3,0}{11} = 1,273.$$

Коэффициент нейтральной поверхности (4)

$$Z = \frac{r_m}{\rho_n} = -0,433 \ln \frac{R_1}{R_2} + 0,995 = -0,433 \ln 1,273 + 0,995 = 0,89.$$

Соответственно, продеформированные наружный и внутренний радиусы торовой поверхности изогнутого элемента (3)

$$\left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} \right)^2 \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - 1 \right) = \frac{R_1}{R_2} Z - 1 = 1,3 \cdot 0,89 - 1 = 0,13297;$$

$$\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \left(\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} + 1 - 2Z \right) \left(2 - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \right) = 1 - Z = 1 - 0,89 = 0,11.$$

Методом итерации устанавливаются

$$R_{\text{нар}}/\rho_n = 1,1083 \text{ и } R_{\text{вн}}/\rho_n = 0,8913.$$

Радиус нейтральной поверхности

$$\rho_n = r_m / Z = 11 / 0,89 = 12,36 \text{ мм}.$$

Средний диаметр торовой поверхности сворачивания также принимается под углом $\alpha = 45^\circ$ относительно начального периода изгиба листовой заготовки по ребру матрицы с последующим спрямлением стенки свернутого стакана в конце очага деформации (рис. 6):

$$d_{1m} \approx d_1 + 0,586 r_n = 77 + 0,586 \cdot 12,36 = 84,24 \text{ мм}.$$

Площадь соответствующего поперечного кольцевого сечения (1)

$$F = \pi d'_1 S = \pi 84,24 \cdot 3,0 = 793,9 \text{ мм}^2.$$

Деформация формоизменения при последовательном изгибе/спрямлении торовой поверхности стакана по ребру матрицы

$$\varepsilon = 2 \left(\varepsilon_{\theta_{\text{нар}}} + \varepsilon_{\theta_{\text{вн}}} \right) = 2 \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \right) = 2(1,1083 - 0,8913) = 0,434 \text{ (43,4 \%)}.$$

Сопротивление пластической деформации

$$\sigma_T = \sigma_{0,2} + 12,75 \varepsilon^{0,59} = 98,1 + 12,75 \cdot 43,4^{0,59} = 216 \text{ МПа}.$$

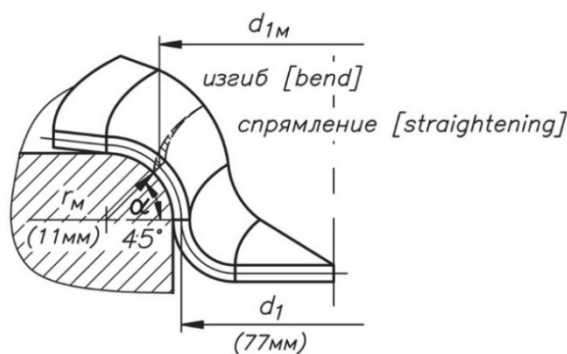


Рис. 6. Деформирование заготовки по ребру матрицы
[Figure 6. Deformation of the workpiece along the edge of the matrix]

Радиальное напряжение в материале (не принимая в расчет утонение в связи с его компенсацией перераспределяющимся объемом металла с фланца заготовки) (4)

$$\sigma_{\rho_{\max}} = \frac{\sigma_T}{2\rho_H} S e^{f \frac{\pi}{2}} = \frac{216}{2 \cdot 12,36} 3,0 e^{0,28 \frac{\pi}{2}} = 40,7 \text{ МПа.}$$

Таким образом, усилие формообразования материала по ребру матрицы

$$P_M = F \sigma_{\rho_{\max}} = 793,9 \cdot 40,7 = 32311,7 \text{ Н (3,29 т).}$$

При допущении распространения радиального напряжения перетягивания материала по ребру матрицы на процесс втягивания фланцевой части заготовки в матрицу устанавливается соответствующее усилие

$$P_{\text{фл}} = \pi d_1 S \sigma_{\rho_{\max}} = \pi 77 \cdot 3,0 \cdot 40,7 = 29536,3 \text{ Н (3,01 т).}$$

В результате общая сила формообразования рассматриваемого стакана

$$P = P_n + P_M + P_{\text{фл}} = 1,05 + 3,29 + 3,01 = 7,35 \text{ т.}$$

4. Заключение

Найденная сила формообразования с учетом напряженно-деформированного состояния материала $P = 7,35$ т с достаточной точностью согласуется с результатами эксперимента вытяжки, приведенного выше.

Следует отметить, что, используя классический метод расчета, основанный на использовании предела прочности $\sigma_b = 210$ МПа, усилие вытяжки

$$P = F \sigma_b = \pi d_1 S \sigma_{0,2} = \pi 77 \cdot 3,0 \cdot 210 = 152398,7 \text{ Н (15,54 т),}$$

что более чем в два раза превосходит экспериментальную величину.

Полученные результаты позволят смоделировать напряженно-деформированное состояние металла при разработке технологии листовой вытяжки: установить величину утонения, оценить уровень радиальных напряжений формообразования скруглений торцовых поверхностей по торцевым кромкам матрицы и давящего пуансона, а также определить силовые параметры формообразования, что позволит предупредить разрушение вытягиваемой детали, гарантируя получение качественной продукции, и точнее подойти к выбору деформирующего оборудования.

Список литературы / References

1. Sandeep P. Patil, Rahul Murkute, Nima Shirafkan, Bernd Markert. Deformation of Stacked Metallic Sheets by Shock Wave Loading. *Metals*. 2018;8(9):679. <https://doi.org/10.3390/met8090679>
2. Kailun Zheng, Politis D.J., Liliang Wang, Jianguo Lin. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2018;1(2):55–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.006>

3. Wenzheng Dong, Yantao Li, Qiquan Lin, Zhigang Wang, Zhen Huang. Theoretical and experimental investigation on deformation modes in cylindrical cup drawing with central pre-hole. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:961–968. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.399>
4. Zicheng Zhang, Ning Chen, Tsuyoshi Furushima, Bin Li. Deformation behavior of metal foil in micro pneumatic deep drawing process. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:1422–1428. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.339>
5. Song Yang, McPhillimy M., Taufik Bin Mohamed Supri, Yi Qin. Influences of process and material parameters on quality of small-sized thin sheet-metal parts drawn with multipoint tooling. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:992–999. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.395>
6. Amrut Mulay, B. Satish Ben, Syed Ismail, Kocanda A., Jasinski C. Performance evaluation of high-speed incremental sheet forming technology for AA5754 H22 aluminum and DC04 steel sheets. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018;4:1275–1287. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.03.004>
7. Li W.D., Meng B., Wang C., Wan M., Xu L. Effect of pre-forming and pressure path on deformation behavior in multi-pass hydrodynamic deep drawing process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;121:171–180. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.01.010>
8. Sandeep P. Patil, Kaushik G. Prajapati, Vahid Jenkouk, Herbert Olivier, Bernd Markert. Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process. *Metals*. 2017;7(12):556. <https://doi.org/10.3390/met7120556>
9. Doig M., Isik K., Clausmeyer T., Heibel S., Richter H., Tekkaya A.E. Material Characterization and Validation Studies for Modeling Ductile Damage during Deep Drawing. *Procedia Engineering*. 2017;183:77–82. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.014>
10. Barthau M., Liewald M. New approach on controlling strain distribution manufactured in sheet metal components during deep drawing process. *Procedia Engineering*. 2017;207:66–71. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.740>
11. Guo N., Sun C.Y., Fu M.W. Size effect affected deformation characteristics in micro deep drawing of TWIP domed-bottom cups. *Procedia Engineering*. 2017;207:2072–2077. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1066>
12. Yamashita M., Nikawa M., Kuroda T. Effect of strain-rate on forming limit in biaxial stretching of aluminum sheet. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:877–883. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.177>
13. Amir Atrian, Hamed Panahi. Experimental and finite element investigation on wrinkling behaviour in deep drawing process of Al3105/Polypropylene/Steel304 sandwich sheets. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:984–991. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.396>
14. Klos A., Kahrimanidis A., Wortberg D., Merklein M. Experimental and Numerical Studies on the Forming Behavior of High Strain Al-Mg-Si(-Cu) Sheet Alloys. *Procedia Engineering*. 2017;183:95–100. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.017>
15. Heibel S., Nester W., Clausmeyer T., Tekkaya A.E. Failure assessment in sheet metal forming using a phenomenological damage model and fracture criterion: experiments, parameter identification and validation. *Procedia Engineering*. 2017;207:2066–2071. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1065>
16. Bruschi S., Altan T., Banabic D., Bariani P.F., Brosius A., Cao J., Ghiotti A., Khraisheh M., Merklein M., Tekkaya A.E. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2014;63(2):727–749. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.005>
17. Wiebenga J.H., Atzema E.H., An Y.G., Vegter H., van den Boogaard A.H. Effect of material scatter on the plastic behavior and stretchability in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(2):238–252. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.008>
18. Marchenko V.L., Rudman L.I., Zaychuk A.I. *Spravochnik konstruktora shtampov: listovaya shtampovka [Stamp Designer Reference: Sheet Stamping]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1988. (In Russ.)
Марченко В.Л., Рудман Л.И., Зайчук А.И. и др. Справочник конструктора штампов: листовая штамповка. М.: Машиностроение, 1988. 496 с.
19. Devendar G.A., Chennakesava R. Study on Deep Drawing Process Parameters – A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016;7(6):149–155.
20. Reddy A.C.S., Rajesham S., Reddy P.R., Kumar T.P., Goverdhan J. An experimental study on effect of process parameters in deep drawing using Taguchi technique. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2015; 7(1):21–32. <http://dx.doi.org/10.4314/ijest.v7i1.3>
21. Ishimaru E., Takahashi A., Ono N. Effect of material properties and forming conditions on formability of high-purity ferritic stainless steel. *Nippon Steel Technical Report*. 2010;99:26–32. Available from: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9905.pdf> (accessed: 30.05.2020).
22. Kokhan L.S., Lebedev N.N., Morozov Yu.A., Mochalov N.A. *Proektirovanie kalibrov sortovykh stanov i operatsiy listovoy shtampovki [Designing gauges section mills and stamping operations]*. Moscow: MGVM Publ.; 2007. (In Russ.)
Кохан Л.С., Лебедев Н.Н., Морозов Ю.А., Мочалов Н.А. Проектирование калибров сортовых станов и операций листовой штамповки. М.: МГВМИ, 2007. 340 с.

23. Kokhan L.S., Morozov Yu.A., Shulgin A.V. Change of thickness of walls of cylindrical glasses at an extract without clip. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014;(5):9–13. (In Russ.) Available from: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/11216> (accessed: 30.05.2020).

Кохан Л.С., Морозов Ю.А., Шулгин А.В. Изменение толщины стенок цилиндрических стаканов при вытяжке без прижима // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2014. № 5. С. 9–13.

24. Morozov Yu.A. The study of marginal deformations of the leaf extracts with regard to plastic thinning and destruction of the material. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(5):353–359. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359>

Морозов Ю.А. Исследование предельных деформаций листовой вытяжки с учетом пластического утонения и разрушения материала // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 5. С. 353–359. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359>

25. Verhov E.Yu., Morozov Yu.A. Analysis and development of manufacturing technology of bent plate parts. *Bulletin of the Moscow State Open University. Series: Technique and Technology*. 2011;4(6):14–19. (In Russ.)

Верхов Е.Ю., Морозов Ю.А. Анализ и разработка технологии изготовления гнутых толстолистовых деталей // *Вестник московского государственного открытого университета. Серия: Техника и технология*. 2011. № 4 (6). С. 14–19.