

ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ  
THEORY OF PLASTICITYDOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359  
УДК 672.32

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование предельных деформаций листовой вытяжки  
с учетом пластического утонения и разрушения материала

Ю.А. Морозов

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

## История статьи:

Поступила в редакцию: 15 мая 2019 г.  
Доработана: 28 августа 2019 г.  
Принята к публикации: 15 сентября 2019 г.

## Аннотация

**Цель.** В работе производится анализ процесса листовой вытяжки и разрабатывается методика определения минимальной кривизны торового скругления при формообразовании цилиндрического изделия (стакана) с учетом пластического утонения деформируемого материала торцевой кромкой давящего пуансона. **Методы.** Проанализирована существующая схема формоизменения с использованием допустимых коэффициентов вытяжки и предела прочности материала, представляющих основу деформационно-силового расчета, который зачастую игнорирует фактор деформационного утонения и его влияние на прочность материала, что в совокупности может привести к превышению допускаемых напряжений в материале, обуславливающему его разрыв. Разрабатывается математическая модель объемного напряженного состояния металла, позволяющая оценить величину утонения при формообразовании торовой поверхности различной кривизны с последующей аппроксимацией найденных величин полиномиальной функцией. Рассматривая критерием предельных нагрузок уровень радиальных напряжений при сворачивании и растягивании листового материала с учетом его утонения, устанавливается минимальная кривизна скругления торовой поверхности стакана. **Выводы.** Полученные результаты позволят смоделировать напряженно-деформированное состояние металла при разработке технологии листовой вытяжки: установить величину утонения и оценить уровень радиальных напряжений при формообразовании скругления торовой поверхности для предупреждения разрушения вытягиваемого стакана (отрыв доньшка), что гарантирует получение качественной продукции.

**Ключевые слова:** вытяжка; нейтральное сечение; утонение; радиус кривизны; интенсивность деформации

## Для цитирования

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. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359>

## Введение

При разработке технологического процесса листовой штамповки, в частности – вытяжки, пожалуй, основным критерием реализуемости процес-

са являются общеизвестные коэффициенты вытяжки, устанавливающие соотношение диаметров сворачиваемого пространственного изделия (полуфабриката) и плоской заготовки (рис. 1)

$$d_1 = D_3 m_1; \quad d_2 = d_1 m_2 \text{ и т.д.,}$$

где  $d_1, d_2$  – диаметр вытягиваемого изделия;  $D_3$  – диаметр заготовки;  $m_1, m_2$  – коэффициенты вытяжки, устанавливающие возможность деформирования металла и ограничиваемые его разрушением [1–3].

Морозов Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в машино- и приборостроении. eLIBRARY SPIN-код: 3189-5426. ORCID iD: 0000-0001-9229-7398. Author ID: 24475032700.

© Морозов Ю.А., 2019



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

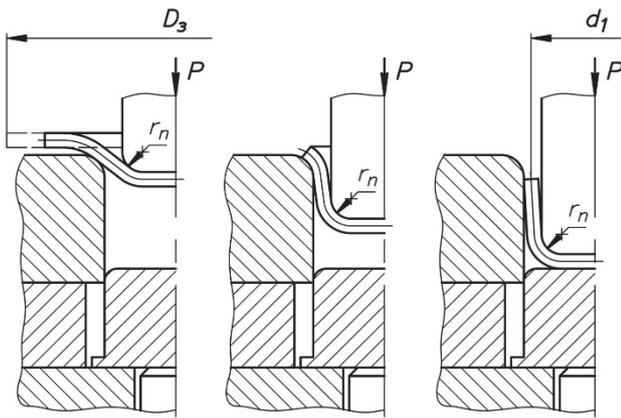


Рис. 1. Схема вытяжки  
[Figure 1. Schematic drawing]

Установленный таким образом диаметр полуфабриката, характеризующий площадью поперечного сечения  $F$  кольцевого элемента в виде развертки полого изделия, будет определять максимальную силу деформирования (вытяжки) с учетом предела прочности материала  $\sigma_s$ .

$$P = F \sigma_s.$$

Выражая площадь кольцевого элемента через его периметр  $L$  и толщину стенки  $S$  или приравняв периметр полого изделия к длине окружности цилиндрического изделия  $L = \pi d$ , нетрудно получить искомое выражение для конкретной конфигурации детали:

$$F = L S = \pi d S. \quad (1)$$

На этом, в общем, и заканчивается деформационно-силовой расчет, который зачастую игнорирует фактор деформационного утонения стенки изделия и его влияние на прочность материала, в пользу отдельного исследования, практически несвязанного с вышеизложенными силовыми параметрами формообразования. Хотя общепризнанным является тот факт, что вытяжка со значительными деформациями создает высокую вероятность разрыва металла в более опасном сечении – на торовой поверхности, образованной торцевым радиусом скругления давящего пуансона и представляющей участок наиболее прогрессирующего утонения при переходе от стенок стакана к доньшку.

При этом некорректно рассматривать только одно утонение, уменьшающее поперечное сечение листовой заготовки, так как сопутствующие здесь деформационные процессы формоизменения параллельно приводят к упрочнению материала, то есть к повышению его несущей способности.

Таким образом, здесь важны два фактора – геометрическое утонение и физическое упрочнение материала, причем их совокупное влияние происходит не по диаметру полуфабриката, а в области торцевого радиуса пуансона, характеризующего меньшими периметром и площадью поперечного сечения, создающими вероятность более скорого разрыва материала в сравнении с классическим методом расчета.

### 1. Математическая постановка задачи

Объемное напряженное состояние металла при формообразовании торовой поверхности определяется перпендикулярно направленными радиальными напряжениями  $\sigma_r$ , относительно изгибаемой заготовки; в результате давления слоев металла друг на друга по контуру изделия действуют окружные тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$ ; вдоль образующей изделия действуют продольные напряжения  $\sigma_l$  (рис. 2).

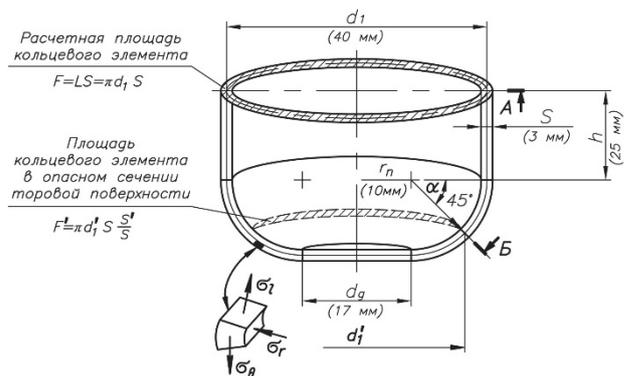


Рис. 2. Распределение напряжений в металле при вытяжке  
[Figure 2. The stress distribution in the metal under the hood]

Совокупность напряжений, вызывающих искривление слоев металла, направлена на возникновение равнозначного деформированного состояния металла в очаге деформации. Согласно условию постоянства объема, взаимосвязь продольных, радиальных и тангенциальных деформаций описывается зависимостью [4]

$$(1 + \varepsilon_l)(1 + \varepsilon_r)(1 + \varepsilon_\theta) = 1.$$

При допущении равенства тангенциальных и продольных деформаций  $\varepsilon_\theta = \varepsilon_l$  устанавливается зависимость для радиальной деформации

$$\varepsilon_r = \frac{1}{(1 + \varepsilon_l)(1 + \varepsilon_\theta)} - 1 = \frac{1}{(1 + \varepsilon_\theta)^2} - 1.$$

Тангенциальная деформация, возникающая при изгибе полосы, обуславливает деформационное изменение наружного и внутреннего радиусов, что приводит к изменению толщины растянутых и сжатых слоев материала, разделяемых радиусом нейтральной поверхности  $\rho_n$  (рис. 3):

$$\varepsilon_{\theta_{нар}} = \frac{R_{нар}}{\rho_n} - 1 \text{ и } \varepsilon_{\theta_{вн}} = \frac{R_{вн}}{\rho_n} - 1. \quad (2)$$

Изменение наружного и внутреннего радиусов выражается через первоначальные радиусы

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

Наружный радиус  $R_1$  под действием радиальной деформации уменьшается, принимая новое условное значение  $R_{нар}$ :

$$\varepsilon_{r_{нар}} = \frac{R_{нар} - R_1}{R_1 - \rho_n} < 0.$$

Внутренний радиус  $R_2$  увеличивается до  $R_{вн}$  под действием соответствующей радиальной деформации:

$$\varepsilon_{r_{вн}} = \frac{R_{вн} - R_2}{\rho_n - R_2} > 0.$$

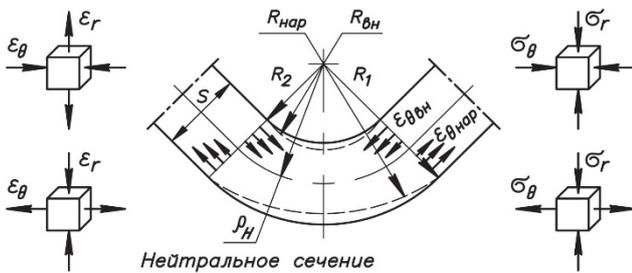


Рис. 3. Распределение тангенциальных деформаций по сечению полосы  
 [Figure 3. Distribution of tangential strain on the cross section of the strip]

Приравнивая тангенциальные и радиальные деформации  $\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_r$ , устанавливаются выражения для определения наружного и внутреннего радиусов изогнутого элемента [5]:

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

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

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:

$$M_{нар} = M_{вн}.$$

## 2. Анализ результатов исследования

Иллюстративным примером можно рассмотреть вытяжку цилиндрического стакана  $\varnothing 40 \times 3$  мм ( $S = 3,0$  мм), имеющего высоту цилиндрической части  $h = 25$  мм. Формообразование торового радиуса скругления осуществляется торцевым радиусом давящего пуансона  $r_n = R_2 = 10$  мм.

Расчет, выполненный по средним размерам изделия, определяет диаметр заготовки [6]:

$$\begin{aligned} D_3 &= \sqrt{4d_1 h + 8 \left( r_n + \frac{S}{2} \right)^2 + 2\pi \left( r_n + \frac{S}{2} \right) d_1 + d_1^2} = \\ &= \sqrt{4 \cdot 40 \cdot 25 + 8 \left( 10 + \frac{3,0}{2} \right)^2 + 2\pi \left( 10 + \frac{3,0}{2} \right) 17 + 17^2} = \\ &= 74,9 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где  $d_d$  – диаметр доньшка стакана.

$$d_d = d_1 - 2r_n - S = 40 - 2 \cdot 10 - 3 = 17 \text{ мм}.$$

В результате коэффициент вытяжки  $m_1 = d_1/D_3 = 40/74,9 = 0,534 < [m_1]$ .

Допускаемый коэффициент вытяжки мягких сталей для первой операции составляет  $[m_1] = 0,56 \dots 0,58$ , что позволяет получение обозначенного стакана уже на первом переходе.

Площадь кольцевого элемента в сечении  $\Delta$ , образованного торцевой кромкой окружности стакана (1):

$$F = \pi d_1 S = \pi 40 \cdot 3,0 = 377 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, установленные «формальные» параметры вытяжки дают представление только о возможности сворачивания листовой заготовки в пространственное изделие и наибольших силовых параметрах процесса для последующего выбора технологического оборудования. При этом вероятность отрыва доньшка имеет по большей части

эмпирическую составляющую, не отражаемую общепринятой методикой расчета.

В связи с этим далее на текущем примере продолжаем развивать теорию пластического изгиба (вытяжки) и связанное с этим деформационное изменение толщины листовой заготовки, определяемое отношением радиусов кривизны:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2 + S}{R_2} = \frac{10 + 3,0}{10} = 1,3.$$

Итерационным перебором при соблюдении обоюдного равенства выражений (3) определяется коэффициент  $Z = 0,8777$ , позволяющий оценить величину деформированных радиусов:

$$\frac{R_{нар}}{\rho_n} = 1,1137 \quad \text{и} \quad \frac{R_{вн}}{\rho_n} = 0,8795.$$

Значения относительных изгибающих моментов

$$\begin{aligned} \bar{M}_{нар} &= \left( \frac{R_{нар}}{\rho_n} - 1 \right)^2 \left( \frac{R_{нар}}{\rho_n} + 1 \right) = \\ &= (1,1137 - 1)^2 (1,1137 + 1) = 0,0273253; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_{вн} &= \left( 1 - \frac{R_{вн}}{\rho_n} \right)^2 \left( 1 + \frac{R_{вн}}{\rho_n} \right) = \\ &= (1 - 0,8795)^2 (1 + 0,8795) = 0,0272908. \end{aligned}$$

С различием менее 1 % расчет можно считать окончанным. В противном случае значительное расхождение в величинах изгибающих моментов вынуждает скорректировать положение нейтральной поверхности.

В результате радиус нейтральной поверхности

$$\rho_n = R_2 / Z = 10 / 0,8777 = 11,39 \text{ мм.}$$

Наружный радиус торового скругления и протяженность растянутой зоны

$$R_{нар} = \frac{R_{нар}}{\rho_n} \rho_n = 1,1137 \cdot 11,39 = 12,69 \text{ мм;}$$

$$S_{раст} = R_{нар} - \rho_n = 12,69 - 11,39 = 1,3 \text{ мм.}$$

Следует отметить, что формообразование при вытяжке будет происходить по фиксированному внутреннему радиусу  $R_{вн} / \rho_n = \text{const}$ , обусловленному торцевым радиусом скругления давящего пуансона  $r_n = R_2 = R_{вн} = 10 \text{ мм}$ . В этом случае протяженность сжатой зоны

$$S_{сж} = \rho_n - r_n = 11,39 - 10 = 1,39 \text{ мм.}$$

В результате толщина торовой поверхности после деформирования и коэффициент утонения

$$S' = S_{раст} + S_{сж} = 1,3 + 1,39 = 2,69 \text{ мм;}$$

$$S' / S = 2,69 / 3,0 = 0,897.$$

Использование относительных величин позволяет получить более компактную зависимость, упрощающую приведенную выше структуру вычислений и, соответственно, повышающую точность расчетов за счет исключения промежуточных вычислений:

$$\begin{aligned} \frac{S'}{S} &= \frac{1}{Z(R_1/R_2 - 1,0)} \left( \frac{R_{нар}}{\rho_n} - \frac{r_n}{\rho_n} \right) = \\ &= \frac{1}{0,8777(1,3 - 1,0)} \left( 1,1137 - \frac{10}{11,39} \right) = 0,895. \end{aligned}$$

В табл. 1 приведены расчеты кинематических параметров процесса вытяжки для других отношений наружного и внутреннего радиусов торовой поверхности.

Таблица 1

Кинематические параметры вытяжки  
[Table 1. Kinematic parameters of the hood]

$R_1/R_2$	$Z = R_2/\rho_n$	$R_{нар}/\rho_n$	$R_{вн}/\rho_n$	$S'/S$
1,01	0,9950	1,0049	0,9950	0,992
1,05	0,9760	1,0237	0,9760	0,985
1,10	0,9538	1,0450	0,9539	0,952
1,20	0,9136	1,0822	0,9142	0,925
1,50	0,8150	1,1642	0,8211	0,857
1,75	0,7485	1,2112	0,7634	0,824
2,00	0,6915	1,2465	0,7181	0,803
2,25	0,6417	1,2736	0,6820	0,788
2,50	0,5976	1,2947	0,6528	0,778
2,75	0,5585	1,3115	0,6290	0,771
3,00	0,5235	1,3250	0,6093	0,765

Графическая интерпретация табличных значений в виде криволинейной зависимости представлена на рис. 4.

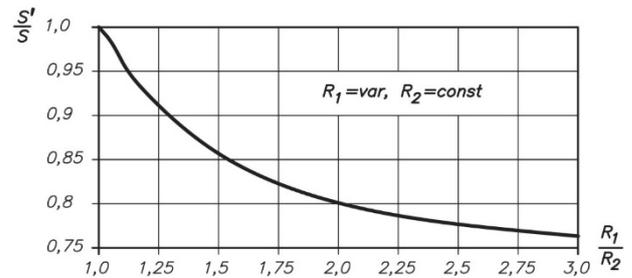


Рис. 4. Утонение листового металла при вытяжке  
[Figure 4. The thinning of sheet metal in the hood]

Лучшее аппроксимирование приведенной зависимости с погрешностью не более 2 % в обозначенном интервале кривизны обеспечивается полиномиальной математической моделью третьего порядка

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

При допущении наиболее прогрессирующего утонения, геометрически расположенного под углом  $\alpha = 45^\circ$  относительно образующего радиуса кривизны торовой поверхности скругления, определяется диаметр и площадь опасного сечения  $\underline{B}$  (рис. 2):

$$d'_1 = d_1 - 2(1 - \cos \alpha)r_n \approx \\ \approx d_1 - 0,586r_n = 40 - 0,586 \cdot 11,39 = 33,3 \text{ мм};$$

$$F' = \pi d'_1 S \frac{S'}{S} = \pi 33,3 \cdot 3 \cdot 0,895 = 280,9 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, сужение площади кольцевого элемента в опасном сечении торовой поверхности в совокупности с прогрессирующим деформационным утонением составило

$$F'/F = 280,9/377 = 0,745,$$

что будет вызывать увеличение растягивающих напряжений в стенке стакана, обусловленных усилием вытяжки, пока они не превысят допускаемых напряжений в материале, провоцирующих его разрыв [7; 8].

Однако ввиду отсутствия точных методик определения усилия вытяжки критерием предельных нагрузок при деформировании будем рассматривать уровень радиальных напряжений при сворачивании и растягивании листового материала по торцевой кромке пуансона [6]:

$$\sigma_{\rho \max} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} S e^{f \frac{\pi}{2}}$$

с учетом утонения  $\sigma_{\rho \max} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} \frac{S}{S'/S} e^{f \frac{\pi}{2}},$

где  $f$  – коэффициент контактного трения.

Принимая во внимание равенство

$$e^{f \frac{\pi}{2}} = 1 + 1,6f,$$

получаем

$$\sigma_{\rho \max} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} \frac{S}{S'/S} (1 + 1,6f), \quad (4)$$

где  $\sigma_T$  – сопротивление пластической деформации:

$$\sigma_T = \sigma_{0,2} + A \varepsilon_i^n; \quad (5)$$

$A, n$  – коэффициенты упрочнения данного материала;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций, характеризующая упрочнение материала и определяемая суммарным значением тангенциальных деформаций на наружной и внутренней поверхностях сворачиваемой торовой поверхности стакана [9]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\theta \text{нар}} + \varepsilon_{\theta \text{вн}}.$$

С использованием зависимостей для тангенциальных деформаций (2) данное выражение можно преобразовать к более простому виду:

$$\varepsilon_i = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} = 1,1137 - 0,8795 = 0,234 \text{ (23,4 \%)}.$$

Принимая модельным материалом сталь ВСтЗсп, имеющую средний предел прочности  $\sigma_B = 425$  МПа, рассчитываются коэффициенты упрочнения (табл. 2) [10]:

$$n = \frac{\sigma_B \delta}{\sigma_B - \sigma_{0,2}} = \frac{425 \cdot 0,26}{425 - 245} \approx 0,6;$$

$$A = \frac{\sigma_B - \sigma_{0,2}}{\delta^n} = \frac{425 - 245}{26^{0,6}} = 25,5.$$

Таблица 2

Механические свойства стали ВСтЗсп (ГОСТ 380-94) [Table 2. Mechanical properties of steel VSt3sp (GOST 380-94)]

Состояние поставки [Delivery condition]	Толщина, мм [Thickness, mm]	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа [Conditional yield strength $\sigma_{0,2}$ , MPa]	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа [Tensile strength $\sigma_B$ , MPa]	$\delta$ , %
Не менее [Nevertheless]				
Прокат горячекатаный [Hot rolled]	До 20	245	370...480	26

В результате сопротивление пластической деформации (5)

$$\sigma_T = \sigma_{0,2} + A \varepsilon_i^n = 245 + 25,5 \cdot 23,4^{0,6} = 414,1 \text{ МПа}.$$

С использованием коэффициента трения  $f = 0,2$  [11] устанавливается радиальное напряжение в материале при формообразовании скругления торовой поверхности стакана (4):

$$\sigma_{\rho_{\max}} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} \frac{S}{S'/S} (1+1,6f) =$$

$$= \frac{414,1}{2 \cdot 11,39} \frac{3,0}{0,895} (1+1,6 \cdot 0,2) = 80,4 \text{ МПа.}$$

Деформационно-силовые параметры сворачивания торовой поверхности при других значениях кривизны приведены в табл. 3.

Таблица 3

Деформационно-силовые параметры вытяжки  
[Table 3. Deformation-force parameters of the hood]

$R_1/R_2$	Интенсивность деформаций, $\epsilon_i$ [Strain intensity, $\epsilon_i$ ]	Сопrotивление пластической деформации $\sigma_T$ , МПа [The resistance to plastic deformation $\sigma_T$ , МПа]	Радиальное напряжение при сворачивании торовой поверхности $\sigma_{\rho_{\max}}$ , МПа [Radial stress at torus surface folding $\sigma_{\rho_{\max}}$ , МПа]
1,01	0,010	270,5	1,800
1,05	0,048	310,4	10,10
1,10	0,091	340,9	22,60
1,20	0,168	383,6	50,00
1,50	0,343	457,7	143,6
1,75	0,448	494,6	222,4
2,00	0,528	520,5	295,9
2,25	0,592	540,1	362,9
2,50	0,642	554,8	422,0
2,75	0,682	566,2	473,6
3,00	0,716	575,7	520,1

### Заключение

Анализ табличных результатов устанавливает значительный уровень радиальных напряжений на торовой поверхности вытягиваемого стакана, приближающихся к начальному пределу текучести при  $R_1/R_2 > 1,75$ .

Максимальная кривизна доньшка стакана, которую теоретически можно выполнить,  $R_1/R_2 \leq 2,5$ , так как при этом в заготовке возникают напряжения, сравнимые с пределом прочности данного модельного материала.

Таким образом, доказаны условия разрушения вытягиваемого стакана (отрыв доньшка) при уменьшении кривизны скругления его торовой поверхности и прогрессирующего утонения ввиду возникновения значительных растягивающих напря-

жений, превышающих начальный предел текучести материала.

### Список литературы

1. *Devendar G., Chennakesava Reddy A.* Study on Deep Drawing Process Parameters – A Review // International Journal of Scientific & Engineering Research. June 2016. Vol. 7. Issue 6. Pp. 149–155.
2. *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. Vol. 7. No. 1. Pp. 21–32.
3. *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 No. 99. September 2010. Pp. 26–32.
4. *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.
5. *Кохан Л.С., Морозов Ю.А., Шульгин А.В.* Изменение толщины стенок цилиндрических стаканов при вытяжке без прижима // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 5. С. 9–13.
6. *Попов Е.А.* Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
7. *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. Vol. 63. Issue 2. Pp. 727–749.
8. *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. February 2014. Vol. 214. Issue 2. Pp. 238–252.
9. *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.
10. *Томленов А.Д.* Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
11. *Исаченков Е.И.* Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.

## The study of marginal deformations of the leaf extracts with regard to plastic thinning and destruction of the material

Yury A. Morozov

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

### Article history:

Received: May 15, 2019  
Revised: August 28, 2019  
Accepted: September 15, 2019

### Abstract

**The aim of work.** The paper analyzes the process of sheet drawing and develops a method for determining the minimum curvature of the torus fillet in the formation of a cylindrical product (glass), taking into account the plastic thinning of the deformable material by the end edge of the pressing punch. **Methods.** The existing scheme of forming with the use of permissible coefficients of drawing and tensile strength of the material, representing the basis of deformation-force calculation, which often ignores the factor of deformation thinning and its impact on the strength of the material, which together can lead to excess of the allowable stress in the material, causing its rupture, is analyzed. A mathematical model of the volume stress state of the metal is developed, which allows to estimate the value of the thinning in the formation of the torus surface of different curvature, followed by the approximation of the values found by a polynomial function. Considering the criterion of limit loads the level of radial stresses during folding and stretching of the sheet material, taking into account its thinning, the minimum curvature of the torus surface of the glass is established. **Results.** The results obtained will allow to simulate the stress-strain state of the metal in the development of sheet drawing technology: to establish the value of thinning and to estimate the level of radial stresses in the formation of the torus surface rounding to prevent the destruction of the elongated glass (separation of the bottom), which guarantees quality products.

**Keywords:** hood; neutral section; thinning; radius of curvature; strain rate

### For citation

Morozov Yu.A. (2019). 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*, 15(5), 353–359. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359>. (In Russ.)

### References

1. Devendar G., Chennakesava Reddy A. (2016). Study on Deep Drawing Process Parameters – A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(6), 149–155.
2. Reddy A.C.S., Rajesham S., Reddy P.R., Kumar T.P., Goverdhan J. (2015). An experimental study on effect of process parameters in deep drawing using Taguchi technique. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 7(1), 21–32.
3. Ishimaru E., Takahashi A., Ono N. (2010). Effect of material properties and forming conditions on formability of high-purity ferritic stainless steel. *Nippon Steel Technical Report No. 99*, 26–32.
4. Kokhan L.S., Lebedev N.N., Morozov Yu.A., Mochalov N.A. (2007). *Proektirovanie kalibrov sortovykh stanov i operatsiy listovoy shtampovki [Designing gauges section mills and stamping operations]*. Moscow: MGVM Publ. (In Russ.).
5. Kokhan L.S., Morozov Yu.A., Shul'gin A.V. (2014). The change in the thickness of walls of cylindrical glasses at the extract without clip. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (5), 9–13. (In Russ.)
6. Popov E.A. (1977). *Osnovy teorii listovoj shtampovki [Fundamentals of sheet metal forming theory]*. Moscow: Mashinostroenie Publ. (In Russ.)
7. Bruschi S., Altan T., Banabic D., Bariani P.F., Brosius A., Cao J., Ghiotti A., Khraisheh M., Merklein M., Tekkaya A.E. (2014). Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 63(2), 727–749.
8. Wiebenga, J.H., Atzema, E.H., An Y.G., Vegter, H., van den Boogaard, A.H. (2014). Effect of material scatter on the plastic behavior and stretchability in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(2), 238–252.
9. Verhov E.Yu., Morozov Yu.A. (2011). Analysis and development of manufacturing technology of bent plate parts. *Bulletin of the Moscow State Open University. Series: Technique and Technology*, 4(6), 14–19. (In Russ.)
10. Tomlenov A.D. (1972) *Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov [Theory of plastic deformation of metals]*. Moscow: Metallurgiya Publ. (In Russ.)
11. Isachenkov E.I. (1978). *Kontaktное trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem [Contact friction and lubricants in metal forming]*. Moscow: Mashinostroenie Publ. (In Russ.)

**Yury A. Morozov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Information Technologies in Machine- and Instrument Engineering. eLIBRARY SPIN-code: 3189-5426. ORCID iD: 0000-0001-9229-7398. Author ID: 24475032700.