

УДК 621.983.3

к.т.н. Коробко Т.Б.,
Токарев А.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПРИ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТА DEFORM 2D

В данной статье рассмотрено применение программного комплекса DeForm 2D для моделирования и анализа распределения толщины заготовки в процессе гофрирования осесимметричных деталей, а также для анализа опасности разрушения изделия в процессе вытяжки.

Ключевые слова: заготовка, гофрирование, напряженно-деформированное состояние, уравнение пластичности, уравнение равновесия, критерий разрушения.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В настоящее время большое внимание уделяется качеству выпускаемой продукции и оптимизации технологий производства. В работах [1, 2] исследуется штамп с поворотными дисками для получения изделий цилиндрической формы.

При помощи поворотных дисков производится образование гофра, при этом снижаются потери на трение на фланце, и происходит накопление металла во фланце с целью снижения тангенциальных напряжений. В конце стадии гофрирования заготовка имеет неравномерное распределение толщины, которое в процессе вытяжки с последующей протяжкой выравнивается. Для расчета распределения толщины заготовки в процессе непосредственной вытяжки в качестве начальных условий необходимо задавать распределение толщины заготовки по окончании стадии гофрирования.

Расчет распределения толщины в процессе гофрирования основан на анализе напряженно-деформированного состояния заготовки.

Постановка задачи. Задачей данной работы является анализ опасности разрушения изделий в процессах обычной вытяжки и при вытяжке в штампах с поворотными дисками.

Изложение материала и его результаты. Расчет распределения толщины являет-

ся довольно трудоемкой задачей, однако, учитывая интенсивное внедрение компьютерной техники во все сферы деятельности и, как следствие, актуальность автоматизации любых расчетов, можно ограничиться лишь записью основных, характерных для данного процесса, уравнений, позволяющих получить необходимый результат существующими численными методами.

В работе [2] проведен анализ напряженно-деформированного состояния металла на стадии гофрирования. Применение полученных выражений показало, что в предложенные уравнения равновесия и пластичности необходимо внести ряд дополнений. Кроме того, получение громоздких формул усложняет расчет (т.е. также требует автоматизации), а упрощения, принятые для их получения, способствуют зарождению погрешностей, величину которых трудно оценить.

На рисунке 1 приведена схема напряженно-деформированного состояния отдельных участков заготовки в процессе гофрирования.

Заготовку можно разбить на следующие участки:

- а) линейные горизонтальные – участки от центра заготовки до т. 1 и от т. 7 до края заготовки;
- б) закругленные – участки 1-2, 3-4, 4-5, 6-7;
- в) линейные конические – участки 2-3, 5-6.

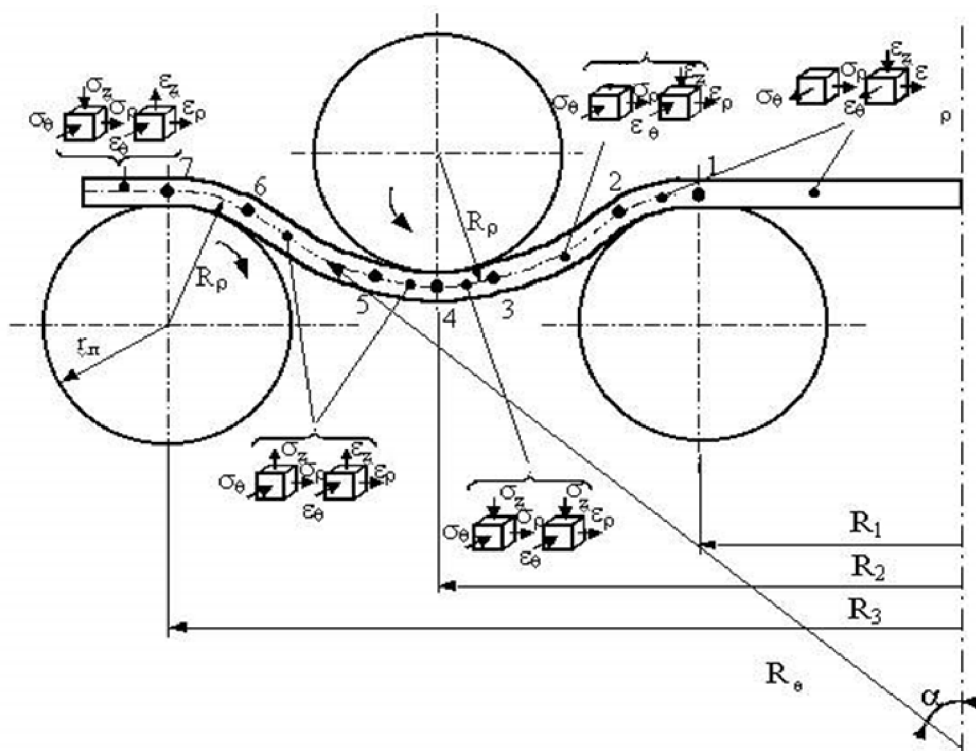


Рисунок 1 – Схема напряженно-деформированного состояния отдельных участков гофрированной заготовки

При составлении уравнений равновесия и пластичности для каждого из участков можно руководствоваться такими допущениями:

- напряженно-деформированное состояние металла плоское (пренебрегаем σ_z);
- распределение толщины по радиусу неоднородно;
- на линейных конических участках контакт с поверхностью штампа отсутствует;
- на участке от края заготовки до т. 7 действует прижим;
- при переходе через т. 4 производная $\frac{d\sigma_\rho}{d\rho}$ меняет знак;
- при переходе через т. 2 тангенциальное напряжение меняет знак (рис. 1).

Таким образом, в соответствии с [2] с учетом знаков радиусов R_ρ и R_θ уравнения равновесия и пластичности будут выглядеть следующим образом:

участок -1

$$\begin{cases} -\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) - \\ -\sigma_\theta \cdot (1 + \mu) = 0 \\ \sigma_\rho + \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s \end{cases} ; \quad (1a)$$

участок 1-2

$$\begin{cases} -\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) - \sigma_\theta + \\ + \frac{\mu \cdot \rho}{\sin(\alpha)} \cdot \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}\right) = 0 \\ \sigma_\rho + \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s \end{cases} ; \quad (1б)$$

участок 2-3

$$\begin{cases} -\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) - \sigma_\theta = 0; \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s \end{cases}; \quad (1в)$$

участок 3-4

$$\begin{cases} -\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) - \sigma_\theta - \\ - \frac{\mu \cdot \rho}{\sin(\alpha)} \cdot \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} - \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}\right) = 0 \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s \end{cases}; \quad (1г)$$

участок 4-5

$$\begin{cases} \rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) - \sigma_\theta - \\ - \frac{\mu \cdot \rho}{\sin(\alpha)} \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{R_\theta} + \frac{\sigma_\rho}{R_\rho}\right) = 0 \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s \end{cases}; \quad (1д)$$

участок 5-6

$$\begin{cases} \rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) - \sigma_\theta = 0; \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s \end{cases}; \quad (1е)$$

участок 6-7

$$\begin{cases} \rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) - \sigma_\theta - \\ - \frac{\mu \cdot \rho}{\sin(\alpha)} \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{R_\theta} - \frac{\sigma_\rho}{R_\rho}\right) = 0 \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s \end{cases}; \quad (1ж)$$

участок 7

$$\begin{cases} \rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) - \\ - \sigma_\theta \cdot (1 + \mu) = 0 \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s \end{cases}, \quad (1з)$$

где ρ , S – текущий радиус и толщина рассматриваемого элемента;

σ_ρ , σ_θ – радиальное и тангенциальное напряжения;

μ – коэффициент трения между элементом и инструментом;

R_ρ и R_θ – радиусы кривизны срединной поверхности элемента в меридиональном и широтном сечениях;

α – угол между касательной к срединной поверхности заготовки в меридиональном сечении в данной точке и осью симметрии.

В уравнениях равновесия составляющую $\frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}$ можно определить из уравнения связи напряжений и деформаций и закона сохранения объема [3]:

$$\frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho} = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{\sigma_\rho - 2 \cdot \sigma_\theta}. \quad (2)$$

Из геометрических соображений радиусы R_ρ и R_θ можно заменить функциями:

$$R_\rho = \frac{|\rho - R'|}{\cos(\alpha)}; \quad R_\theta = \frac{\rho}{\sin(\alpha)}, \quad (3)$$

где R' – радиус оси ближайшего поворотного диска (R_1 , R_2 или R_3).

В процессе гофрирования металл претерпевает упрочнение. Поэтому в выражениях (1) величина σ_s является переменной, зависящей от деформации металла. В данном случае для учета упрочнения металла при дискретизации расчета недопустимо использование степенных функций в связи с большой погрешностью вычислений при малых деформациях. Для этого используем выражение [3, 4]:

$$\sigma_s = \sigma_m + \left(\frac{\sigma_\sigma}{1 - \psi_{uu}} - \sigma_m \right) \times \left(\frac{\psi}{\psi_{uu}} \right)^{\frac{\sigma_\sigma \cdot \psi_{uu}}{(1 - \psi_{uu}) [\sigma_\sigma - \sigma_m (1 - \psi_{uu})]}} \quad (4)$$

где σ_T , σ_B – пределы текучести и прочности;

$\psi_{ш}$ – относительное уменьшение площади поперечного сечения к моменту начала образования шейки;

ψ – текущее значение относительной деформации [4]:

$$\psi_i = 1 - \frac{\rho_i}{\rho_{0i}} \quad (5)$$

где ρ_i , ρ_{0i} – радиус элемента после и до деформации.

При расчете деформаций в зависимости от рассчитанного поля напряжений будем руководствоваться следующими уравнениями:

– уравнение связи напряжений и деформаций, составленное в соответствии с диаграммами Мора [4], которое при $\sigma_z \approx 0$ сводится к виду:

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_\rho - d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_z} \quad (6)$$

где $d\varepsilon_\rho$, $d\varepsilon_\theta$, $d\varepsilon_z$ – приращения деформаций, соответственно, в меридиональном, широтном направлениях, а также перпендикулярно срединной поверхности заготовки;

– закон сохранения объема:

$$\frac{l \cdot S \cdot \rho}{l_0 \cdot S_0 \cdot \rho_0} = 1 \quad (7)$$

где l , S , ρ , l_0 , S_0 , ρ_0 – длина, толщина и радиус элемента после и до деформации;

– уравнение связи приращения радиуса элемента с приращением его длины (из геометрических соображений):

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{\max} - \Delta l \cdot \sin(\alpha) - \Delta\rho_1 \quad (8)$$

где $\Delta\rho$ – действительное изменение радиуса рассматриваемого элемента;

$\Delta\rho_{\max}$ – изменение радиуса рассматриваемого элемента без учета удлинения;

Δl – изменение длины рассматриваемого элемента;

$\Delta\rho_1$ – изменение радиуса элемента за счет удлинения предыдущих элементов.

Приращения деформаций $d\varepsilon_\rho$, $d\varepsilon_\theta$, $d\varepsilon_z$ в соответствии с [3] можно заменить отношением соответствующего приращения к соответствующему параметру:

$$d\varepsilon_\rho = \frac{dl}{l}; d\varepsilon_\theta = \frac{d\rho}{\rho}; d\varepsilon_z = \frac{dS}{S} \quad (9)$$

Исходя из выражений (6)-(9), можно построить алгоритм расчета деформаций, основываясь на рассчитанном поле напряжений и геометрических размерах штампа и исходной заготовки.

Алгоритм расчета процесса деформации основывается на следующем:

– процесс гофрирования разбивается на n шагов по высоте опускания прижима H :

$$n = \frac{H}{\Delta H} \quad (10)$$

где ΔH – шаг изменения высоты прижима;

– заготовка разбивается на $\rho_{\max}/\Delta\rho$ элементов, для каждого из которых рассчитываются деформации;

– в приведенных выражениях все приращения d заменяются на Δ ;

– поле напряжений при определенном $H=n \cdot \Delta H$ рассчитывается приближенно по данным деформаций, полученных при $H=(n-1) \cdot \Delta H$, но с учетом формообразования, т.е. перемещения рассматриваемого элемента без учета его деформации на данном шаге гофрирования;

– расчет геометрических параметров заготовки ведется поэлементно, начиная от центра заготовки, а поля напряжений – от края заготовки, причем радиальное напряжение на краю заготовки под прижимом определится как [3]:

$$\sigma_{кр.з.} = \frac{\mu Q}{\pi \rho_{\max} S} \quad (11)$$

где ρ_{\max} – диаметр заготовки на данном шаге гофрирования;

– на определенном шаге гофрирования определяется угол α_{\min} , затем все геометрические параметры определяются в зависимости от него;

– поле напряжений и деформаций определяется методом итераций с предварительно задаваемой точностью;

– коэффициент трения μ определяется поэлементно в зависимости от соотноше-

ния площадей подвижной и неподвижной частей на данном радиусе.

Выполнен сравнительный анализ технологии глубокой вытяжки в штампе с поворотными дисками и в обычном вытяжном штампе.

В программном комплексе DeForm 2D были смоделированы соответствующие процессы вытяжки.

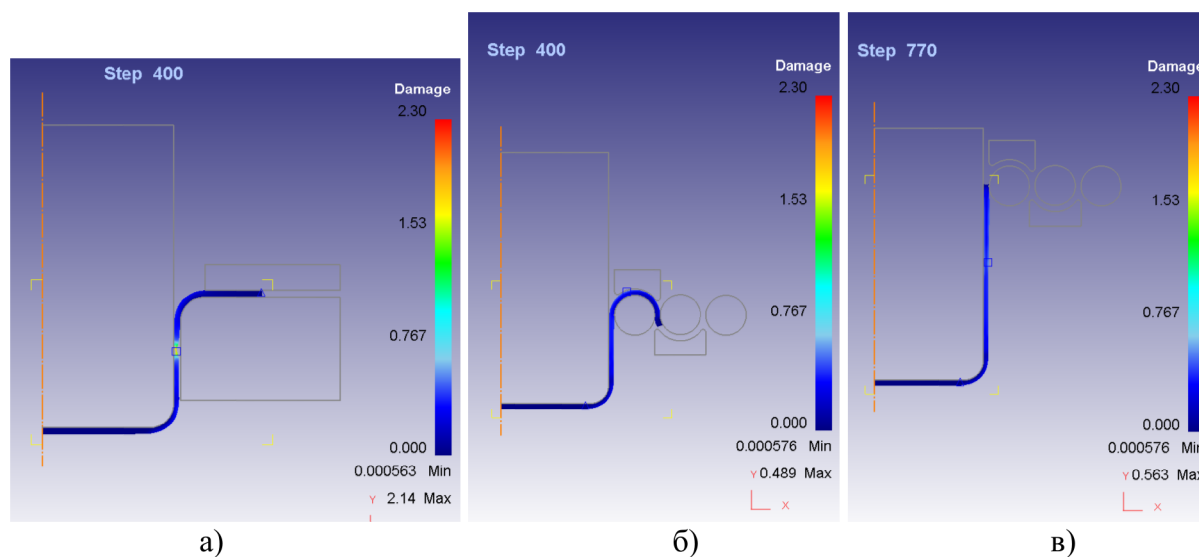


Рисунок 2 – Опасность разрушения изделия в процессах:

а) – обычная вытяжка (разрушение на 400-м шаге расчета); б) и в) – вытяжка в штампе с поворотными дисками на 400-м и 770-м (последнем) шаге моделирования

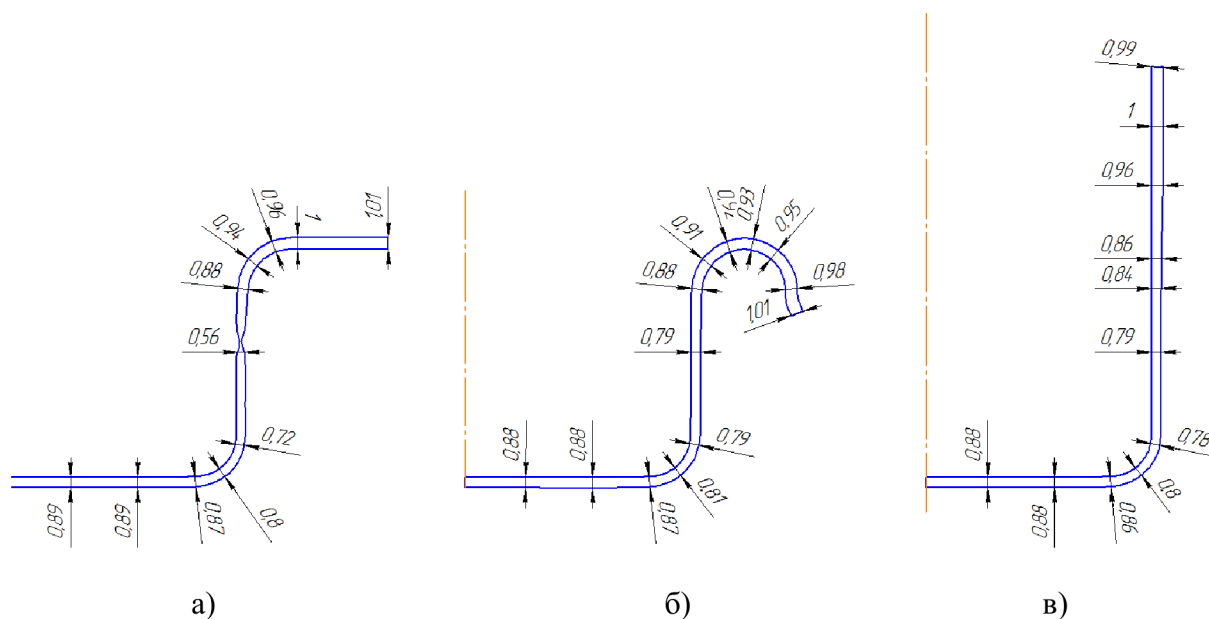


Рисунок 3 – Распределение толщин изделия в процессах:

а) – обычная вытяжка (разрушение на 400-м шаге расчета); б) и в) – вытяжка в штампе с поворотными дисками на 400-м и 770-м (последнем) шаге моделирования без разрушения

Анализ моделей показал преимущество вытяжки в штампе с поворотными дисками с предварительным профилированием заготовки по сравнению с обычной вытяжкой с плоским прижимом.

Выводы и направление дальнейших исследований.

В результате исследований разработан алгоритм расчета распределения толщины

заготовки в процессе гофрирования в штампе с поворотными дисками. Данный алгоритм позволяет вносить корректировки при появлении дополнительных условий (внешние тепловые или электромагнитные воздействия, профилированная исходная заготовка и др.).

Библиографический список

1. Коробко Т.Б. Двухплоскостное перемещение инструмента при глубокой вытяжке с волочением осесимметричных деталей: Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні / Т.Б. Коробко, Г.И. Майоров. — Краматорськ-Хмельницький. — 2002. — С. 30–32.
2. Коробко Т.Б. Анализ напряженно-деформированного состояния при получении кольцеобразного гофра на заготовке под вытяжку: Металлургическая и горнорудная промышленность / Т.Б. Коробко., Г.И. Майоров // Сборник научных трудов, 2002. — № 8,9. — С. 499–504.
3. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки : учебное пособие для вузов / Е.А. Попов. — изд. 2-е, перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1977. — 278 с., ил.
4. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М.В. Сторожев., Е.А. Попов. — изд. 4-е, перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1977. — 423 с., ил.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Новохатским А.М.,
пом. начальника цеха стана 600 по технологии ПАО "АМК" Чичканом А.А.*

Статья поступила в редакцию 26.05.16.

к.т.н. Коробко Т.Б., Токарев О.В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТОВЩИНИ ПРИ ГЛИБОКОМУ ВИТЯГУВАННІ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТУ DEFORM 2D

У даній статті розглянуто застосування програмного комплексу DeForm 2D для моделювання та аналізу розподілу товщини заготовки в процесі гофрування вісесиметричних деталей, а також для аналізу небезпеки руйнування виробів в процесі витягування.

Ключові слова: заготовка, гофрування, напружено-деформований стан, рівняння пластичності, рівняння рівноваги, критерій руйнування.

PhD Korobko T.B., Tokarev A.V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

SIMULATION RESULTS ON THICKNESS DISTRIBUTION DURING DEEP DRAWING OF AXISYMMETRIC PARTS USING DEFORM 2D SOFTWARE PACKAGE

This article deals with the application of DeForm 2D software package for modeling and analyzing of thickness distribution of the ingot during the corrugating of rotationally symmetric parts, as well as to analyze the risk of breaking products during the drawing process.

Key words: ingot, corrugating, stress-strain state, plasticity equation, equilibrium equation, failure criterion.