

МОДЕЛЬ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ИСКУССТВЕННОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

Бровман Т.В., Васильев М.Г.

Тверской государственной технический университет, г. Тверь

Поступила в редакцию 22.03.2014, после переработки 24.04.2014.

В работе предложена методика исследования процесса потери устойчивости при деформации тонколистовых заготовок. Показано, что за счет выдавливания на листе локальных углублений в радиальном направлении можно уменьшить тангенциальные напряжения и повысить качество изделий.

Ключевые слова: имитационная математическая модель, пластическая деформация, анизотропия, потеря устойчивости.

Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2014. № 2. С. 25–32.

Введение

Известно, что для некоторых металлов, сплавов имеет место анизотропия как по величинам модулей упругости, так и по величинам предела текучести. В данной работе проведены исследования по созданию в листовой заготовке искусственной анизотропии для уменьшения жесткости материала в тангенциальном направлении.

В процессе вытяжки заготовки, имеющей начальный радиус R_0 и толщину h , получают цилиндрическую заготовку радиуса R_1 и длиной, приблизительно равной $l = R_0 - R_1$, см. [1-3].

Получение изделий высокого качества затрудняется воздействием значительных тангенциальных напряжений сжатия (при уменьшении диаметра заготовки), что может привести к потере устойчивости. При этом на заготовке возникает 6-8 «волн» выступов амплитудой до 10-15 мм, что приводит к браку.

1. Анализ процесса деформации

Согласно работе Л.А. Шофмана [1], потеря устойчивости происходит, когда безразмерный параметр

$$A = \frac{R_0 - R_1}{h} \quad (1)$$

превышает величину $A = 44$ (см.[1], где приведены и более точные методы определения этой величины).

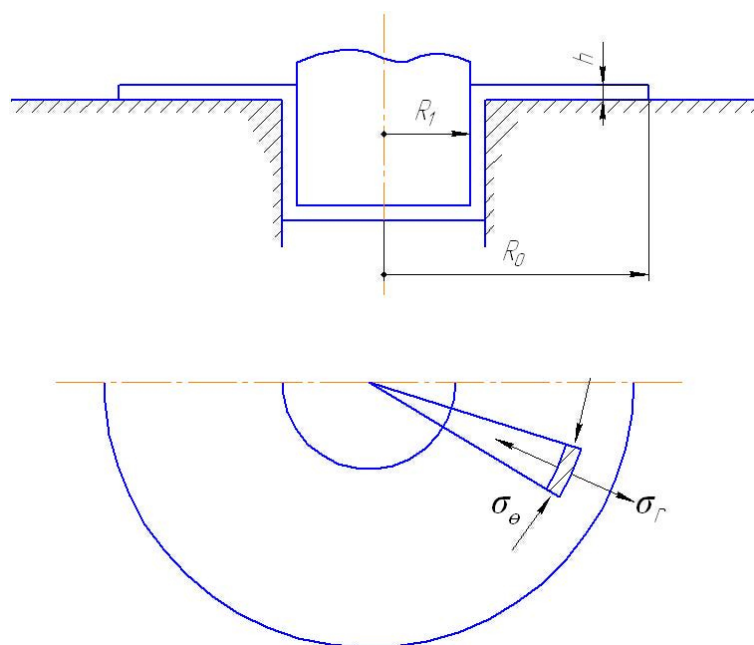


Рис. 1: Схема имитационной модели деформации в процессе вытяжки

Схема имитационной модели показана на Рис. 1, где заштрихован малый элемент, на который действуют напряжения σ_r и σ_θ (остальные компоненты тензора напряжений приняты равными нулю).

При деформации «с прижимом» листовой заготовки увеличиваются растягивающие напряжения σ_r , что приводит к появлению кольцевых трещин. Эти явления наблюдал Д. Шокер на основании опытов, проведенных в Венском технологическом университете (Австрия), рекомендуя нагревать периферийные участки заготовки с помощью лазеров [4].

2. Разработка способа деформации с искусственной анизотропией

На основании проведенных исследований был предложен способ вытяжки с созданием искусственной анизотропии за счет предварительного выдавливания на листовой заготовке малых углублений глубиной $(0,5 \div 1,0)h$, ориентированных в радиальном направлении (см. патент № 2491144, МПК В21D22/20, опубл. Бюл. №24.). Расчетная модель деформации при анизотропии, созданной до начала процесса вытяжки, иллюстрируется Рис. 2, на котором показано, что на заготовке создают 16-28 «волн» – выступов глубиной порядка h .

Можно расположить волны не по краю заготовки, как показано на Рис. 2а, а в ее середине, см. Рис. 2б. Даже выполнение волн амплитудой 0,5-1 мм на цилиндрической части заготовки после частичной деформации вытяжки дает положительный эффект.

Различные варианты волн показаны также на Рис. 2в, 2г, 2д. Глубина впадин для листов толщиной 0,5мм из углеродистой стали составляла 0,5 мм, а число

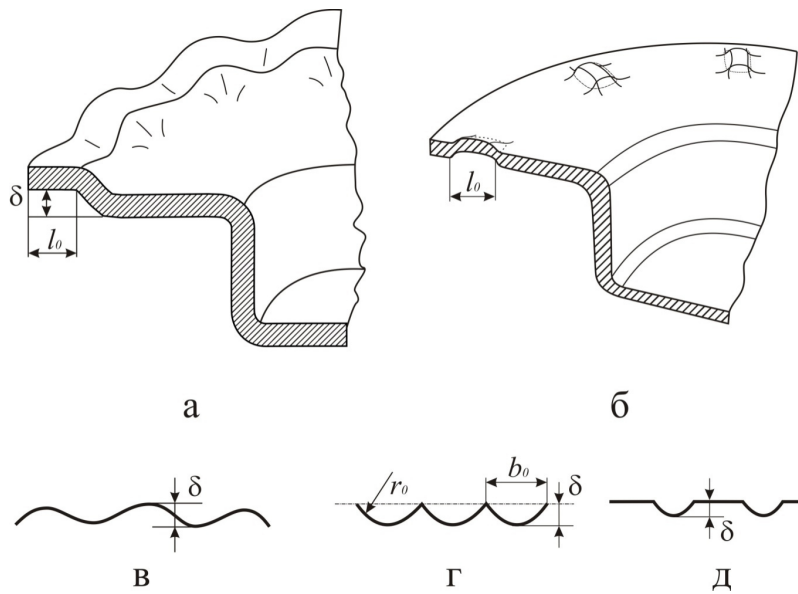


Рис. 2: Схема реализации процесса вытяжки заготовки при создании искусственной анизотропии

волн принимали равным 18-26. «Потери устойчивости» с образованием крупных складок, не происходит и создается возможность получения изделий длиной в 2-3 раза превышающей допустимую длину, соответствующую обычному процессу вытяжки.

Конечно, при деформации амплитуды волн возрастают, иногда в 1.3 раза (и происходит их сжатие – с уменьшением длины «волны» иногда в 1.5 – 2 раза), но не происходит возникновения новых волн большой амплитуды.

На Рис. 3 показана модель численных расчетов на основе схемы деформации изотропного листа и листа с локальным углублением, ориентированным вдоль оси y .

При сжатии деформируемого участка вблизи углубления (Рис. 4) силами P точки A и B перейдут в положения A' и B' , соответственно (форма листа показана пунктиром).

Можно записать, что величина перемещения

$$\Delta l = \frac{P}{C},$$

где жесткость C равна (см. [2] при выдавливании на заготовке «п» волн):

$$C = \frac{bhE}{l} \left(1 - \frac{2r}{l} + \frac{3.84nr^3}{lh^2} \right)^{-1}, \tag{2}$$

где b, l – ширина и длина листа толщиной h , – модуль упругости материала листа, r – радиус углубления. Если, например, при $l = 50$ мм, $h = 1$ мм, $r = 1$ мм выполнить на листе $n = 10$ углублений, то его жесткость уменьшается на 27%.

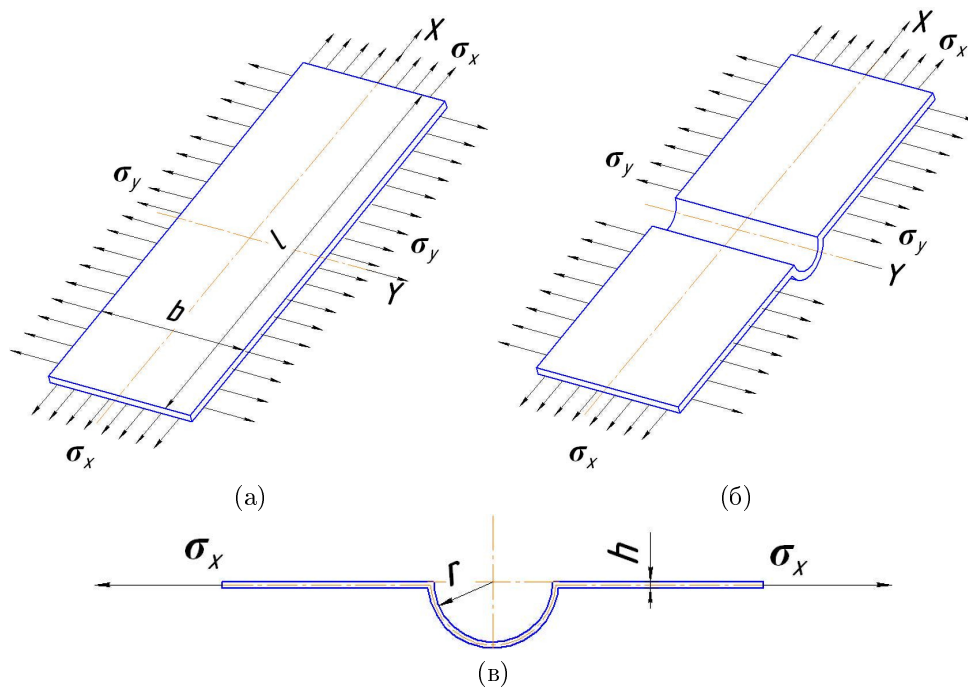


Рис. 3: Схема имитационной модели деформации листа при растяжении: а – изотропного металла, б – при создании анизотропии за счет углубления, в – схема деформации зоны углубления

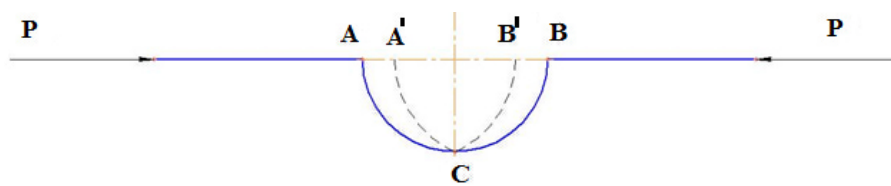


Рис. 4: Механическая схема для расчета деформации при действии напряжений сжатия

3. Кинематически допустимое поле скоростей

Для построения модели численных расчетов используем кинематически допустимые поля скоростей. Известно, что кинематически допустимым является такое поле скоростей течения, которое:

1. удовлетворяет условию несжимаемости,
2. удовлетворяет краевым условиям для скоростей в данной задаче,
3. определяет положительную величину мощности.

Если эти условия выполнены, то определена величина мощности N (без учета анизотропии), которая не может быть меньше, чем мощность определенная точным решением, см. [2]. Кинематически допустимое поле скоростей иллюстрирует Рис. 5, его можно построить из двух зон, одна из которых движется как жесткое тело в направлении, параллельном оси z , см. Рис. 5 в этой зоне скорости равны: $V_z = -V_0$; $V_r = 0$. Во второй зоне, имеющей форму диска, с наружным радиусом R_0 (Рис. 5) принята поле скоростей:

$$V_r = -V_0 \frac{R_1}{r}; V_z = 0, \tag{3}$$

где размеры показаны на Рис. 5.

Такое поле является кинематически возможным, если существует граничная поверхность, на которой равны нормальные компоненты векторов скоростей обеих зон. Как показано в [2], такая поверхность существует и является параболоидом

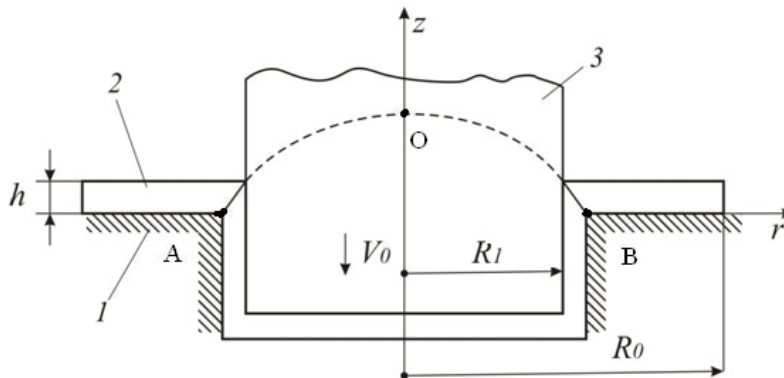


Рис. 5: Расчетная схема осесимметричной деформации

вращения. Уравнение этой поверхности в координатах rz (Рис. 5) имеет вид:

$$z = \frac{(R_1 + h)^2 - r^2}{2R_1 + h}. \tag{4}$$

Во внешней кольцевой зоне, в которой реализуется согласно (3) радиальное течение, компоненты тензора скорости деформации $\dot{\epsilon}_r = v_0 \frac{R_1}{r^2}$; $\dot{\epsilon}_\theta = -v_0 \frac{R_1}{r^2}$; $\dot{\epsilon}_z = 0$, а второй инвариант этого тензора $N = 2 \frac{v_0 R_1}{r^2}$.

Мощность деформации в этой зоне определяется интегрированием

$$N_1 = \int_{R_1}^{R_0} 2\pi r k h H dr = 4\pi k v_0 R_1 h \ln \frac{R_0}{R_1},$$

где k – величина предела текучести при сдвиге. Мощность определяют через инвариант H для идеально пластических сред без упрочнения (т.е. с постоянным пределом текучести [2,3]).

На граничной поверхности параболоида АОВ (Рис. 5) непрерывны нормальные компоненты векторов скоростей для обеих зон, но тангенциальные компоненты могут иметь и имеют разрыв. Поэтому надо учесть мощность среза на границе двух зон на поверхности АОВ, равную:

$$N_2 = \int_{R_1}^{R_1+h} 2\pi r k \Delta v \sqrt{1 + (z')^2} dr,$$

где $\Delta v = \frac{v_0}{z'} \sqrt{1 + (z')^2}$ разрыв тангенциальной компоненты скорости на поверхности параболоида, определяемого формулой (4) и мощность среза равна:

$$N_2 = 2\pi k v_0 R_1 h \left(1 + \frac{h}{2R_1} \right)$$

и в большинстве случаев $\frac{h}{2R_1} \ll 1$, поэтому этой величиной можно пренебречь.

С учетом трения на опорной поверхности диска можно определить:

$$P = \frac{1}{v_0} (N_1 + N_2 + \mu P v_0).$$

Отсюда следует, что

$$P = \frac{2\pi k R_1 h}{1 - \mu} \left(1 + 2 \ln \frac{R_0}{R_1} \right), \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения скольжения заготовки по опорной поверхности.

В этой задаче полная мощность определена усилием. Например, если $R_1 = 0,05$ м, $R_0 = 0,08$ м; $h = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $\mu = 0,10$, $\sigma_T = 350 \frac{MH}{m^2}$, $k = 202 \frac{MH}{m^2}$, то согласно (1) получим величину усилия:

$$\begin{aligned} P &= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 202 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{1 - 0,1} \left(1 + 2 \ln \frac{0,08}{0,05} \right) = \\ &= 0,14095 \cdot 1,93886 = 0,273 \text{ MH}, \text{ т.е. } = 273 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Можно применять (для оценки границы величины усилия) и формулу, основанную на поле скоростей, определяющем срез вдоль окружности радиуса $(R_1 + h)$

$$P = 2\pi k (R_1 + h) h.$$

Во многих случаях оценки величин верхних границ усилий, определенные построением кинематически допустимых полей скоростей являются полезными, но желательнее проведение экспериментальных исследований для анализа возможных

погрешностей. Такие опыты с измерениями усилий были проведены в Тверском государственном техническом университете. Согласно этим данным, формула (1) определяет результаты, завышенные на 12-15%.

Заключение

Основная идея предлагаемого подхода к анализу уменьшения анизотропии тонколистовых заготовок, получаемых глубокой вытяжкой, состоит в том, чтобы, заранее создать на листе большое количество углублений – «волн» малой амплитуды для предотвращения возможности появления 4-8 складок большой амплитуды и значительно уменьшить жесткость деформируемой заготовки в тангенциальном направлении. Такой способ с созданием искусственной анизотропии был использован в технологическом процессе при изготовлении более 10 тысяч масляных фильтров диаметром 96 мм из стали 08 кп на Тверском предприятии ОАО 2462 ЦБПР.

Показано, что деформация листа в процессе вытяжки создает в кольцевой зоне плоского диска напряженное состояние, соответствующее растяжению в радиальном направлении и сжатию в тангенциальном направлении. Такое сжатие может привести к потере устойчивости и образованию выступов в форме волн. Методика исследования потери устойчивости, основанная на построении кинематически допустимых полей скоростей, определяет верхнюю границу усилия и мощности для деформируемых заготовок.

Список литературы

- [1] Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1964. 375 с.
- [2] Brovman T.V., Vasiljev M.G. New technological process of drawing // Journal of Harmonized Research in Engineering. 2014. Vol. 2(1). Pp. 201–207.
- [3] Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
- [4] Schocker D. Enhancing press technology: laser assisted deep drawing // International Sheet Metal Review. 2000. № 4. Pp. 58–60.

Библиографическая ссылка

Бровман Т.В., Васильев М.Г. Модель численных расчетов искусственной анизотропии при деформации тонколистового металла // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2014. №2. С. 25–32.

Сведения об авторах

1. **Бровман Татьяна Васильевна**
доцент Тверского государственного технического университета.
Россия, 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22, ТГТУ.
2. **Васильев Михаил Геннадьевич**
ст. преподаватель Тверского государственного технического университета.
Россия, 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22, ТГТУ.

NUMERICAL CALCULATIONS MODEL FOR ARTIFICIAL ANISOTROPY IN THE DEFORMATION OF SHEET METAL

Brovman Tatyana Vasilyevna

Associate Professor of Tver State Technical University
Russia, 170026, Tver, 22 Afanasy Nikitin quay, TSTU.

Vasilyev Mikhail Gennadyevich

Senior Lecturer of Tver State Technical University
Russia, 170026, Tver, 22 Afanasy Nikitin quay, TSTU.

Received 22.03.2014, revised 24.04.2014.

In work the mathematical model for calculating the process buckling deformation of sheet blanks is investigated. It has been shown that by extruding on a sheet of local depressions in the radial direction can be reduced in the tangential stresses and improve the quality of products.

Keywords: mathematical simulation model, plastic deformation, anisotropy, stability loss.

Bibliographic citation

Brovman T.V., Vasilyev M.G. Numerical calculations model for artificial anisotropy in the deformation of sheet metal. *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika* [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics], 2014, no. 2, pp. 25–32. (in Russian)