

В. В. Савуляк, к. т. н.

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ШТАМПОВАНИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье проанализировано влияние параметров трения на математическую модель деформирования листового материала во время штампования. На рабочих поверхностях пуансона и матрицы предложено формировать повышенную шероховатость в продольном направлении профиля для приведения напряженного состояния материала к плоскому виду.

Ключевые слова: напряжение, деформации, листовый материал, штампование, плоское напряженное состояние.

Постановка задачи

Процессы обработки давлением относят к ресурсосберегающим технологиям из-за незначительного количества отходов производства. Это благоприятствует их широкому использованию, которое сдерживается пробелами в исследовании процессов формообразования. В свою очередь использование листовых материалов для изготовления конструкций высокой жесткости в определенном направлении позволяет повысить эффективность использования металла и удешевить изделия [1, 2].

Для моделирования процесса формообразования регулярных профилей на листовых материалах штампованием на прессах целесообразно рассматривать этапы: 1) рабочий ход пуансона до контакта с листом; 2) от начала контакта пуансона с листом к моменту остановки пуансона; 3) холостой ход пуансона (разгрузка листа). От параметров второго этапа технологического процесса зависят возможности процесса, конструкция оснастки и характеристики изделия. Во время рабочего хода в момент появления контакта поверхностей пуансон – лист – матрица появляются нормальные силы между поверхностями и, как противодействие возможному проскальзыванию листа, возникают силы трения. Для проскальзывания листа между матрицей и пуансоном разность сил растяжения относительно выступа пуансона или матрицы (рис. 1) должна превысить силу трения покоя между элементами матрица – лист и лист – пуансон [3]. Нужно также отметить, что во время образования одновременно многих гофров такие растягивающие усилия будут частично уравниваться относительно оси симметрии профиля (рис. 1), но лист будет проскальзывать к центру штампа. Поэтому размеры заготовки должны быть больше размеров готового изделия, а после штампования должна проводиться операция обрезания остатков листа. Дополнительной особенностью изготовления штампованием регулярных профилей из листовых материалов является неоднозначность влияния трения на напряженно-деформированное состояние заготовки.

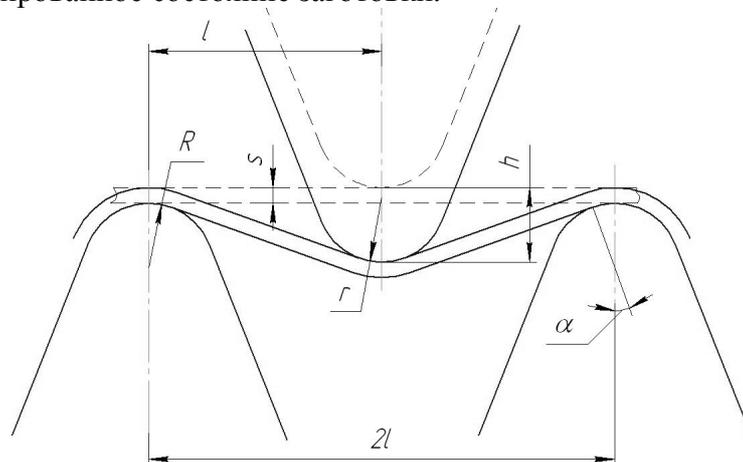


Рис. 1. Схема прогиба листа во время штампования

В этой работе проведён анализ влияния микрогеометрии поверхности на напряжения, которые возникают во время формообразования регулярных профилей с криволинейными участками.

Модель напряженно-деформированного состояния во время штампования

В каждой из точек контакта листа и пуансона кроме нормальных реакций возникают также силы трения направленные против возможного проскальзывания листа и вдоль оси z (направлена перпендикулярно к плоскости рисунка 1). Согласно представлениям о формоизменении материала во время изгиба внутренняя часть листа (с радиусом кривизны меньше радиуса нейтральной поверхности) в направлении оси z увеличивает длину [4], а сила трения противодействует этой возможной деформации. Если лист имеет относительно большую длину, то сила трения направленная вдоль оси z возрастает и уменьшает деформацию растяжения на поверхности листа в этом направлении. Если коэффициент трения большой, и сила трения покоя в направлении оси z достаточная для обеспечения отсутствия проскальзывания в этом направлении, то на внутренней поверхности листа деформация $\varepsilon_z = 0$. То есть напряженное состояние на внутренней поверхности заготовки изменит вид из *двухосного сжатия – одноосного растяжения* в *двухосное сжатие*. Фактически это приводит к уменьшению показателя жесткости напряженно-деформированного состояния η и уменьшению использования ресурса пластичности металла [5, 6, 7]. С другой стороны большой коэффициент трения между заготовкой и инструментом приводит к повышению показателя жесткости напряженного состояния [3].

Если не учитывать изменение толщины заготовки, то условия деформирования постоянны вдоль оси z. На основе выше изложенного можно считать, что деформация ε_z не зависит от z и может быть представлена в виде $\varepsilon_z = \varepsilon_z(\rho, \theta)$ с краевыми условиями: $\varepsilon_z(r, \theta) = 0$, $\varepsilon_z(\rho_n, \theta) = 0$, $\varepsilon_z(\rho > \rho_n, \theta) < 0$. Поскольку $\dot{\varepsilon}_z = \frac{d\varepsilon_z}{d\tau}$, где τ – параметр времени, то $\dot{\varepsilon}_z = \dot{\varepsilon}_z(\rho, \theta)$.

Математическая модель процесса штампования базируется на уравнениях равновесия для плоского напряженного состояния [4]

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_\rho}{\rho \partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + 2 \frac{\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0, \end{cases} \tag{1}$$

уравнениях связи

$$\begin{cases} \sigma_\rho - \sigma = \frac{2}{3} \sigma_u \frac{\dot{\varepsilon}_\rho}{\dot{\varepsilon}_u}, \\ \sigma_\theta - \sigma = \frac{2}{3} \sigma_u \frac{\dot{\varepsilon}_\theta}{\dot{\varepsilon}_u}, \\ \sigma_z - \sigma = \frac{2}{3} \sigma_u \frac{\dot{\varepsilon}_z}{\dot{\varepsilon}_u}, \\ \tau_{\rho\theta} = \frac{1}{3} \sigma_u \frac{\dot{\gamma}_{\rho\theta}}{\dot{\varepsilon}_u}, \end{cases} \tag{2}$$

и условия неразрывности

$$\dot{\varepsilon}_\rho + \dot{\varepsilon}_\theta + \dot{\varepsilon}_z = 0, \tag{3}$$

где $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{\rho\theta}$ – нормальные и касательное напряжения; $\dot{\epsilon}_\rho, \dot{\epsilon}_\theta, \dot{\epsilon}_z$ – скорости относительных деформаций в соответствующих направлениях; $\dot{\gamma}_{\rho\theta}$ – скорость относительной деформации сдвига; $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij}$ – среднее напряжение (гидростатическое давление); $\sigma_u = Ae_u^n$ – интенсивность напряжений; A и n – параметры кривой упрочнения материала; $e_u = \ln(\rho/\rho_n)$ – степень деформации; ρ_n – радиус кривизны нейтральной поверхности.

Для участка листа, который подвергается изгибу, при условии несжимаемости материала (постоянства объема) и отсутствия деформаций в нейтральном слое, радиус кривизны нейтральной поверхности в общем случае определяется

$$\rho_n = (r + 0,5s') \frac{s'}{s} \cdot \frac{z'}{z}, \quad (4)$$

где s – толщина листа до деформации; s' – толщина участка листа после деформации; r – внутренний радиус кривизны заготовки (соответствует радиусу кривизны выступов на пуансоне); z – длина участка листа вдоль оси z до деформирования; z' – длина участка листа вдоль оси z после деформирования.

Анализ выражения (4) показывает, что уменьшение величины относительного удлинения листа в осевом направлении z'/z во время деформирования уменьшает относительное утончение листового материала $(s-s')/s$, а это приводит к перераспределению напряжений на большую площадь поперечного перереза и уменьшению их интенсивности.

Для случая действия на поверхности листа сжимающих контактных напряжений $\sigma_\kappa(\theta)$ радиус кривизны нейтральной поверхности может быть рассчитан [4]

$$\rho_n = \sqrt{r(r+s) \exp \frac{-\sigma_\kappa(\theta)}{\sigma_u}}. \quad (5)$$

Скорости деформаций определяются [4]

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_\rho = \frac{\partial \mathcal{G}_\rho}{\partial \rho}, \\ \dot{\epsilon}_\theta = \frac{\partial \mathcal{G}_\theta}{\rho \partial \theta} + \frac{\mathcal{G}_\rho}{\rho}, \\ \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial z}, \\ \dot{\gamma}_{\rho\theta} = \frac{\partial \mathcal{G}_\theta}{\partial \rho} + \frac{\partial \mathcal{G}_\rho}{\rho \partial \theta} - \frac{\mathcal{G}_\theta}{\rho}. \end{cases} \quad (6)$$

Для решения системы уравнений (2 – 6) примем гипотезу, что скорости перемещения точки материала v_θ и v_z могут быть представлены в виде [8]

$$\begin{cases} \mathcal{G}_\theta = a(\theta) \cdot (\rho - \rho_n) = a \cdot (\rho - \rho_n), \\ \mathcal{G}_z = b(\rho, \theta), \end{cases} \quad (7)$$

где $a(\theta)$ и $b(\rho, \theta)$ – некоторые функции.

Решая (3) с учетом (6) и (7) получим

$$\mathcal{G}_\rho = a' \left(\rho_n - \frac{\rho}{2} \right) + \frac{c}{\rho}, \quad (8)$$

где $a' = \frac{\partial a(\theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial a}{\partial \theta}$; c – константа.

Подставляя (7) и (8) в (6) после упрощения получим

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{a'}{2} - \frac{c}{\rho^2}; \\ \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{a'}{2} + \frac{c}{\rho^2}; \\ \dot{\varepsilon}_z = 0; \\ \dot{\gamma}_{\rho\theta} = a + \frac{a''(2\rho_n - \rho)}{2\rho}, \quad a'' = \frac{\partial^2 a}{\partial \theta^2}. \end{cases} \quad (9)$$

Функция $a(\theta)$ определяется из системы уравнений (9) при условии, что относительные деформации $\varepsilon_\rho = 0, \varepsilon_\theta = 0, \varepsilon_z = 0, \gamma_{\rho\theta} = 0$ для $\rho = \rho_n$. Относительные деформации можно получить как интеграл соответствующих скоростей относительных деформаций по параметру времени τ . Принимая скорость V и перемещение пуансона h известными, можно записать $\tau = \frac{h(s')}{V}$. Тогда из (9) получим

$$\varepsilon_\rho = \int_0^\tau \dot{\varepsilon}_\rho d\tau = - \int_0^{\frac{h(s')}{V}} \left(\frac{a'}{2} + \frac{c}{\rho^2} \right) d\left(\frac{h(s')}{V} \right) = - \frac{1}{V} \int_0^{\frac{h(s')}{V}} \left(\frac{a'}{2} + \frac{c}{\rho^2} \right) d(h(s')), \quad (10)$$

где функция $h(s') = h$ задана в неявном виде системой

$$\begin{cases} h(s') = R + r + \cos \alpha \cdot (l - (R + r) \cdot (1 + \sin \alpha)), \\ \operatorname{tg} \alpha = \frac{(h(s') + s - s') \cdot l}{l^2 - (h(s') - s') \cdot s}, \end{cases} \quad (11)$$

где α – угол изгиба листа.

Поскольку $V \neq 0$ и, как видно из (11) и (10), подинтегральная функция не зависит от изменения толщины листа, то из (10) на основании условия $\varepsilon_\rho = 0$ для $\rho = \rho_n$, получим

$c = \frac{-a' \cdot \rho_n^2}{2}$. Аналогично для относительной деформации сдвига можно записать, что для $\rho = \rho_n, \gamma_{\rho\theta} = 0$. На основании решения этого условия и (11) запишем

$$a(\theta) = k_1 \cdot \sin(\sqrt{2}\theta) + k_2 \cdot \cos(\sqrt{2}\theta), \quad (12)$$

где k_1, k_2 – константы.

Из (12) и (9) получим

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\rho_n^2}{\rho^2} \right) \left(-k_1 \sin(\sqrt{2}\theta) + k_2 \cos(\sqrt{2}\theta) \right), \\ \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\rho_n^2}{\rho^2} \right) \left(-k_1 \sin(\sqrt{2}\theta) + k_2 \cos(\sqrt{2}\theta) \right), \\ \dot{\varepsilon}_z = 0, \\ \dot{\gamma}_{\rho\theta} = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho} \right) \left(k_1 \cos(\sqrt{2}\theta) + k_2 \sin(\sqrt{2}\theta) \right). \end{cases} \quad (13)$$

Для плоского напряженного состояния

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{2 \left(1 - \frac{\rho_H^2}{\rho^2}\right)^2 \left(-k_1 \sin(\sqrt{2}\theta) + k_2 \cos(\sqrt{2}\theta)\right)^2 + \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho}\right)^2 \left(k_1 \cos(\sqrt{2}\theta) + k_2 \sin(\sqrt{2}\theta)\right)^2} \quad (14)$$

В [3] рассмотрено взаимодействие штамповой оснастки и листа во время деформирования и сформулировано условие проскальзывания заготовки между поверхностями матрицы и пуансона. Величину такого проскальзывания или его отсутствие определяют на основе коэффициента трения f . Это позволяет уточнить величину контактных напряжений $\sigma_\rho(r, \theta) = \sigma_k(\theta)$ и $\tau_{\rho\theta}(r, \theta) = \sigma_k(\theta)f$ на внутренней поверхности листа (при условии отсутствия проскальзывания), провести расчет использованного ресурса пластичности и напряженно-деформированного состояния материала во время штампования и определить коэффициенты k_1 и k_2 для конкретных условий деформирования. Изменение коэффициента трения в разных направлениях обеспечивается за счет конструктивных особенностей штамповой оснастки.

Подставляя (2), (13), (14) в (1) получаем

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} - \frac{2}{3} \sigma_u \frac{\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta}{\rho \dot{\varepsilon}_u}, \\ \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \theta} = \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sigma_u \frac{\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta}{\dot{\varepsilon}_u} \right), \end{cases} \quad (15)$$

где

$$\tau_{\rho\theta} = \frac{\sigma_u \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho}\right) \left(k_1 \cos(\sqrt{2}\theta) + k_2 \sin(\sqrt{2}\theta)\right)}{\sqrt{6 \left(1 - \frac{\rho_H^2}{\rho^2}\right)^2 \left(-k_1 \sin(\sqrt{2}\theta) + k_2 \cos(\sqrt{2}\theta)\right)^2 + 2 \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho}\right)^2 \left(k_1 \cos(\sqrt{2}\theta) + k_2 \sin(\sqrt{2}\theta)\right)^2}} \quad (16)$$

Поскольку в крайней точке контакта листа и пуансона с координатами $\theta = \alpha$ и $\rho = r$ сдвиговые напряжения равны нулю, а интенсивность деформаций не равна нулю, то $k_1 = -k_2 \cdot \operatorname{tg}(\sqrt{2}\alpha)$. Таким образом, выражения (12), (13), (14) и (16) примут вид

$$a(\theta) = k_2 \cdot \frac{\cos(\sqrt{2}\alpha + \sqrt{2}\theta)}{\cos(\sqrt{2}\alpha)}; \quad (17)$$

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\rho_H^2}{\rho^2}\right) k_2 \frac{\cos(\sqrt{2}\alpha - \sqrt{2}\theta)}{\cos(\sqrt{2}\alpha)}, \\ \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\rho_H^2}{\rho^2}\right) k_2 \frac{\cos(\sqrt{2}\alpha - \sqrt{2}\theta)}{\cos(\sqrt{2}\alpha)}, \\ \dot{\varepsilon}_z = 0, \\ \dot{\gamma}_{\rho\theta} = \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho}\right) k_2 \frac{\sin(\sqrt{2}\theta - \sqrt{2}\alpha)}{\cos(\sqrt{2}\alpha)}; \end{cases} \quad (18)$$

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{k_2}{\sqrt{3} \cos(\sqrt{2}\alpha)} \sqrt{2 \left(1 - \frac{\rho_H^2}{\rho^2}\right)^2 \left(\cos(\sqrt{2}\alpha - \sqrt{2}\theta)\right)^2 + \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho}\right)^2 \left(\sin(\sqrt{2}\alpha - \sqrt{2}\theta)\right)^2}; \quad (19)$$

$$\tau_{\rho\theta} = \frac{-\sigma_u}{\sqrt{3}} \frac{\left(1 - \frac{\rho_n}{\rho}\right) \sin(\sqrt{2}\alpha - \sqrt{2}\theta)}{\sqrt{2\left(1 - \frac{\rho_n^2}{\rho^2}\right)^2 \left(\cos(\sqrt{2}\alpha - \sqrt{2}\theta)\right)^2 + \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho}\right)^2 \left(\sin(\sqrt{2}\alpha - \sqrt{2}\theta)\right)^2}}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что поверхностные касательные напряжения не зависят от коэффициента трения, а нормальные – обратно пропорциональны. Таким образом, увеличение коэффициента трения f приводит к уменьшению поверхностной деформации вдоль оси z , уменьшению сжимающих и увеличению сдвиговых напряжений, т. е. увеличивается жесткость напряженного состояния внутренней части листа. Уменьшение коэффициента трения f смягчает напряженное состояние внутренней части листа и увеличивает деформацию вдоль оси z , что приводит к уменьшению радиуса кривизны нейтральной поверхности (для листовых материалов большой ширины). Поэтому, с изменением коэффициента трения f происходят два встречных процесса, которые изменяют жесткость напряженного состояния. Управляя величиной коэффициента трения в каждом из направлений, можно подобрать наиболее благоприятные условия для деформирования.

Выводы

1. Представленная математическая модель формирования заготовок из листового материала позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние в зоне изгиба листа.

2. Проведенный анализ показал целесообразность формирования силы трения разной величины в разных направлениях относительно оси матрицы и пуансона. Для направления вдоль оси регулярного профиля желательнее увеличивать коэффициент трения, а в тангенциальном направлении – коэффициент трения должен быть минимальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тришевский О. И. Снижение металлоёмкости гнутых профилей за счёт деформационного упрочнения / О. И. Тришевский, Е. Г. Полстянкин, Р. Ю. Дебердеев // Сталь. – 1988. – № 8. – С. 36 – 37.
2. Стеблюк В. И. Разработка теории и методов интенсификации формоизменяющих операций листовой штамповки: дис... д-ра техн. наук : 05.03.05 / Стеблюк Владимир Иванович. – К., 1998. – 340 с.
3. Savuliak V. Modelling of the process of regular profiles stamping from sheet materials / V. Savuliak // Buletinul institutului politehnic din Iasi. – 2011. – Tomul LVII (LXI). Fasc. 4. – P. 199 – 208.
4. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
5. Сивак И. О. Получение гофрированных заготовок методами локальной пластической деформации / И. О. Сивак, В. В. Савуляк // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – 2003. – С. 392 – 394.
6. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.
7. Сивак И. О. Штампування гофрованих заготовок з використанням гідростатичного підпору / И. О. Сивак, В. В. Савуляк // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – 2004. – С. 331 – 335.
8. Сивак И. О. Дослідження процесу виготовлення гофрованих заготовок / И. О. Сивак, В. В. Савуляк // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – 2005. – С. 287 – 290.

Савуляк Виктор Валерьевич – к. т. н., доцент кафедры технологии и автоматизации машиностроения.

Винницкий национальный технический университет.