

В. В. Савуляк, к. т. н.; И. Ю. Малёванный

РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ

В статье проанализировано влияние параметров покрытия на напряженно-деформированное состояние листовой заготовки во время сгибания. Для уменьшения критического радиуса изгиба на внешнюю поверхность основы предлагается наносить покрытие с меньшей прочностью, чем у материала основы. Найдены оптимальные соотношения прочности основы и покрытия для достижения минимальных радиусов изгиба.

Ключевые слова: напряжение, деформации, листовой материал, сгибание, плоское напряженное состояние, покрытие.

Постановка задачи

Листовое штампование рассматривают как один из перспективных методов изготовления легких и прочных изделий сложной конфигурации. Это позволяет использовать конструкции, изготовленные на основе листовых заготовок, для решения широкого круга конструкторских задач [1]. Но, следует заметить, что в большинстве случаев применяют листовые материалы с покрытиями, позволяющими повысить коррозионную стойкость, обладающими лучшими антифрикционными свойствами и внешним видом, более высокой температуроустойчивостью и т. д. Сегодня существует много различных способов нанесения покрытий на разнообразные поверхности, при чем наиболее производительным и дешевым является нанесение на плоские и цилиндрические поверхности. В то же время, деформирование листовых материалов с покрытием недостаточно распространено из-за отсутствия методики подбора физико-механических свойств покрытия для обеспечения минимальных радиусов кривизны элементов изделия.

Оценка возможной предельной деформации материала в современной обработке давлением происходит с использованием безразмерных критериев, которые базируются на диаграммах предельных деформаций и параметрах напряженно-деформированного состояния изделий [2]. В общем случае напряженно-деформированное состояние деталей определяют уравнениями равновесия, связи, целостности среды и граничными условиями деформирования [3, 4].

Основными физико-механическими параметрами металла, которые определяют напряженно-деформированное состояние и возможность последующего деформирования, являются кривая текучести и поверхность предельных деформаций. Эти основные характеристики зависят от структуры материала, химического состава, термической обработки, скорости приложения и локализации и вида нагрузки. Из всего вышесказанного следует, что, управляя этими параметрами можно увеличивать и уменьшать предельные радиусы изгиба листовых заготовок для достижения нужного результата.

В этой работе проводится анализ влияния параметров кривой текучести покрытия на напряженно-деформированное состояние подложки во время формообразования регулярных профилей с криволинейными участками.

Напряженно-деформированное состояние листа с покрытием во время сгибания

Во время рабочего хода пуансона между поверхностями заготовки (основа + покрытие) и пуансона и матрицы возникают нормальные реакции и силы трения, которые для широкого

листа в процессе сгибания создают плоское напряженное состояние [3, 5, 6], то есть деформация $\varepsilon_z = 0$.

Считая толщину основы и покрытия постоянными и одинаковыми и допуская, что заготовка относительно пуансона не перемещается [6], можно считать напряжение в зоне контакта пуансона и основы равномерно распределенным.

Математическая модель процесса штампования базируется на уравнениях равновесия для плоского напряженного состояния, уравнениях связи и условии неразрывности, дополненными физическими уравнениями равновесия участка основы и покрытия, которые поддаются сгибанию (рис. 1). Для случая отсутствия на внешней поверхности листа контактных напряжений уравнения равновесия участка заготовки будут иметь вид

$$\begin{cases} \sigma'_{\rho 1} \cdot \sin \alpha \cdot r - \sigma''_{\rho 1} \cdot \sin \alpha \cdot (r + s_1) + 2 \int_r^{r+s_1} \sigma_{\theta 1} d\rho \cdot \sin \alpha = 0, \\ \sigma'_{\rho 2} \cdot \sin \alpha \cdot (r + s_1) + 2 \int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{\theta 1} d\rho \cdot \sin \alpha = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_{\theta 1}, \sigma_{\theta 2}$ – тангенциальные нормальные напряжения в основе и покрытии соответственно; $\sigma_{\rho 1}, \sigma_{\rho 2}$ – радиальные нормальные напряжения в основе и покрытии соответственно; $\sigma'_{\rho 1}$ – радиальное нормальное напряжение в основе в зоне контакта основы и пуансона; $\sigma''_{\rho 1}, \sigma'_{\rho 2}$ – радиальные нормальные напряжения в зоне контакта основы и покрытия соответственно; α – угол изгиба, который имеет заготовка.

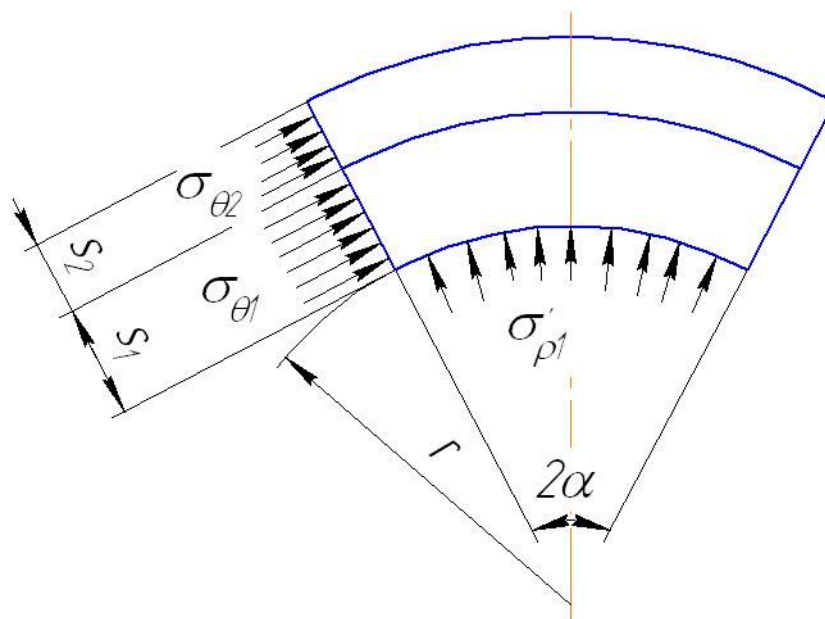


Рис. 1. Схематическое изображение элемента заготовки во время сгибания

В процессе сгибания в области, прилегающей к нейтральной поверхности, с радиусом ρ_n располагается зона упругих деформаций. Расстояние от нейтральной поверхности к краю зоны Δ_{yn} упругих деформаций может быть рассчитано [3]

$$\Delta_{yn} = 2\rho_n \cdot \left(\frac{A}{E} \right)^{\frac{1}{1-n}}, \quad (2)$$

где A и n – параметры кривой упрочнения материала; E – модуль упругости Юнга.

Для диапазона изменения параметров кривой упрочнения $A = 100 - 3000$ МПа и $n = 0 - 0,5$, характерные для большинства конструкционных материалов, коэффициент $\left(\frac{A}{E}\right)^{\frac{1}{1-n}}$ в уравнении (2) изменяется в пределах от 0 до 0,015 (рис. 2). Для небольших радиусов изгиба, соизмеримых с толщиной листа, зоной упругих деформаций, можно пренебречь. В [7] показано, что радиальные и тангенциальные нормальные напряжения в зоне изгиба мало зависят от угла поворота сечения, поэтому можно считать, что тангенциальные нормальные напряжения имеют линейное распределение по толщине (для листов толщиной до 3 мм) и могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta 1} &= a_1(\rho - \rho_n), \\ \sigma_{\theta 2} &= a_2(\rho - \rho_n),\end{aligned}\quad (3)$$

где a_1 и a_2 – константы.

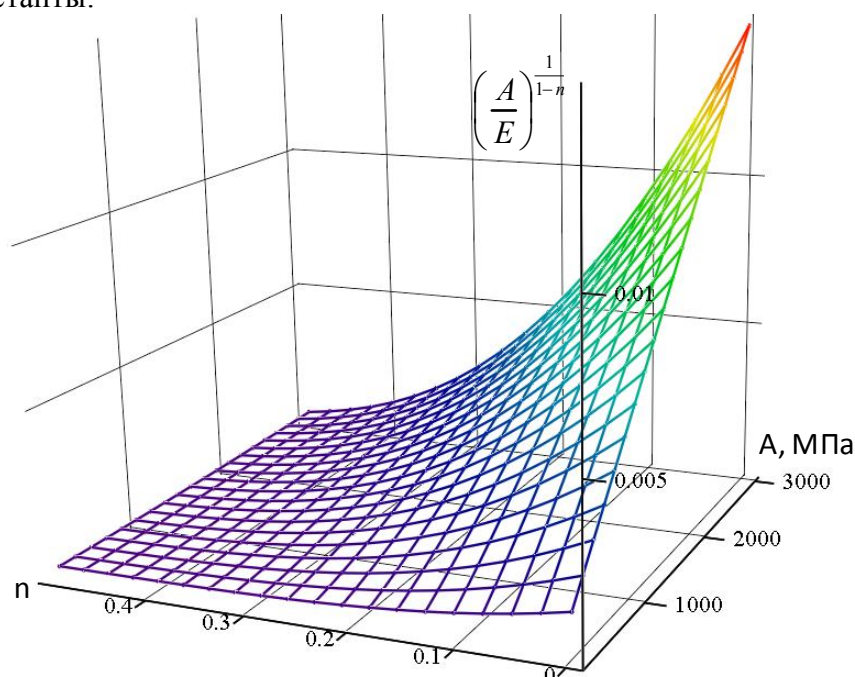


Рис. 2. Зависимость относительной ширины зоны упругой деформации стального листа от параметров кривой упрочнения A и n

При отсутствии разрывов на границе раздела покрытия и основы $\sigma_{\rho 1}'' = \sigma_{\rho 2}'$. Преобразуя (1), получаем

$$\frac{\sigma_{\rho 1}' \cdot r}{s_1 \cdot s_2} + \frac{2}{s_2} \frac{\int_r^{r+s_1} \sigma_{\theta 1} d\rho}{s_1} + \frac{2}{s_1} \frac{\int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{\theta 2} d\rho}{s_2} = 0, \quad (4)$$

где $\frac{\int_r^{r+s_1} \sigma_{\theta 1} d\rho}{s_1}$ и $\frac{\int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{\theta 2} d\rho}{s_2}$ – средние тангенциальные нормальные напряжения.

Сила в плоскости сечения, с которой пуансон действует на лист может быть представлена

$$P = \int_{0_1}^{\alpha} r \cdot \sigma'_{\rho 1} \cdot \cos \theta d\theta - 2 \sin \alpha \int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{\theta 2} d\rho - 2 \sin \alpha \int_r^{r+s_{12}} \sigma_{\theta 1} d\rho. \quad (5)$$

На основе предположения о равномерном распределении нормального радиального напряжения в зоне контакта листа и пуансона и из (4)

$$\sigma'_{\rho 1} = \frac{P}{3r \cdot \sin \alpha}. \quad (6)$$

Подставляя в (4) выражения (3) и (6) и преобразуя их, запишем

$$a_2 = -\frac{\frac{P}{3 \sin \alpha} + 2a_1(0,5s_1^2 + r \cdot s_1 - \rho_n \cdot s_1)}{2(0,5s_2^2 + r \cdot s_2 + s_1 \cdot s_2 - \rho_n \cdot s_2)}. \quad (7)$$

Поскольку, как отмечалось раньше, напряженное состояние плоское и контакт листа и пуансона во всех направлениях неподвижный, то на основании уравнений связи и совместимости деформаций в зоне контакта основы и пуансона получим

$$\sigma' = \sigma'_z = \sigma'_{\rho 1} \cdot f, \quad (8)$$

$$\sigma'_{\rho 1} = -\sigma'_{\theta 1} + 2\sigma', \quad (9)$$

где f – коэффициент трения между листом и пуансоном; σ' – гидростатическое давление в зоне контакта пуансона и заготовки.

Из (8) и (9) следует

$$a_1 = \frac{P \cdot (1 - 2f)}{3r \cdot \sin \alpha \cdot (r - \rho_n)}. \quad (10)$$

В уравнении (10) неизвестной величиной является лишь радиус кривизны нейтральной поверхности. Для его определения в работе [8] используют выражение

$$\rho_n = r + K \cdot s, \quad (11)$$

где $K = \frac{t}{s}$ – константа, которая зависит от свойств кривой течения, радиуса кривизны внутренней поверхности листа и способа сгибания; t – расстояние от внутренней поверхности заготовки к нейтральной поверхности [8]. В [8] показано, что с увеличением прочности материала или радиуса r K -фактор увеличивается и изменяется в пределах от 0,33 до 0,5. Авторы [9] для $r < 2s$ рекомендуют принимать коэффициент $K = 0,33$, а для $r > 2s$ фактор $K = 0,5$. Однако в выражении (11) применяется толщина s однородного слоя металла, то есть для ее применения необходимо определить приведенную толщину покрытия s_{np} . Авторами предложено определять s_{np} на основе одинаковой интенсивности напряжений для покрытия и листа замещения

$$\int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \sigma_{u 2} d\rho = \int_{r+s_1}^{r+s_{np}} \sigma_{u 1} d\rho, \quad (12)$$

или

$$A_2 \int_{r+s_1}^{r+s_1+s_2} \left(\ln \left(\frac{\rho}{\rho_n} \right) \right)^{n_2} d\rho = A_1 \int_{r+s_1}^{r+s_{np}} \left(\ln \left(\frac{\rho}{\rho_n} \right) \right)^{n_1} d\rho, \quad (13)$$

где $\sigma_u = A e_u^n$ – интенсивность напряжений; $e_u = \ln(\rho/\rho_n)$ – степень деформации; A_1 и n_1 –

параметры кривой течения материала основы; A_2 и n_2 – параметры кривой течения материала покрытия.

Решением уравнения (13) можно воспользоваться для определения ρ_n из (11) или $\rho_n = \sqrt{r(r + s_1 + s_{np})}$ [4] (r – радиус кривизны внутренней поверхности; s_{np} – приведенная толщина покрытия; s_1 – толщина основы).

Таким образом, на основе выражений (6), (7) и (10) и численного решения уравнения (13) получаем граничные условия для определения напряженно-деформированного состояния во время сгибания. Анализ (13) показывает, что покрытие более прочное, чем основа позволяет сместить радиус кривизны ко внешней поверхности и за счет этого уменьшить деформации растяжения, которые способствуют самому быстрому использованию ресурса пластичности.

Для плоского напряженного состояния интенсивность деформаций может быть рассчитана

$$\sigma_{u1} = A_1 \cdot \left(\ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{n_1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\theta 1})^2 + (\sigma_{\theta 1} - \sigma_{z1})^2 + (\sigma_{z1} - \sigma_{\rho 1})^2} + \frac{3}{2} \tau_{\rho\theta 1}^2. \quad (14)$$

Учитывая, что $\sigma_{z1} = \sigma_1 = \frac{\sigma_{\rho 1} + \sigma_{\theta 1}}{2}$ из (14), запишем

$$\tau_{\rho\theta 1} = \sqrt{\frac{4}{3} A_1^2 \left(\ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{2n_1} - (\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\theta 1})^2}. \quad (15)$$

Из уравнений равновесия для плоского напряженного состояния после превращений можно записать

$$\sigma_{\rho 1} = a_1 \left(\frac{\rho}{2} - \rho_n \right) - \int_0^\theta \left(\rho \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\theta 1}}{\partial \rho} + 2\tau_{\rho\theta 1} \right) d\theta. \quad (16)$$

Численное решение (16) с помощью программных средств позволяет определить напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе деформирования и подобрать покрытие с параметрами кривой прочности, которые обеспечивают возможность получения минимальных радиусов кривизны.

Выводы

1. Представленная математическая модель формирования заготовок из листового материала с покрытием позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние в зонах листа, которые поддаются сгибанию.

2. Проведенный анализ показал, что подбор покрытия с определенными характеристиками кривой упрочнения позволяет влиять на величину компонентов тензора напряжений и, соответственно, на показатель напряженного состояния.

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. Дель Г. Д. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г. Д. Дель, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 4. – С. 135 – 140.
3. Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М. И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
4. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
5. 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.

6. Вплив тертя на процес штампування регулярних профілів з листових матеріалів заготовок [Електронний ресурс] / В. В. Савуляк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2011. – № 3. Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_3/2011-3.files/uk/11vvstsm_ua.pdf.
7. Сивак І. О. Дослідження процесу виготовлення гофрованих / І. О. Сивак, В. В. Савуляк // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – 2005. – С. 287 – 290.
8. Pahole I. Bending of sheet metal of complicated shapes (for 90° angle and more) in combined tools / I. Pahole, S. Bonifarti, M. Ficko, B. Vaupotic, S. Kovacic, J. Balic // Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering. – Vol. 16, Issue 1 – 2, 2006. – P. 88 – 93.
9. Hakim S. Sultan Aljibori. Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process / Hakim S. Sultan Aljibori, Abdel Magid Hamouda // European Journal of Scientific Research.. – Vol.33, № 1. – 2009. – P. 57 – 69.

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

Малёванный Игорь Юрьевич – студент.

Винницкий национальный технический университет.