

но меняться и при изменении степени упрочнения материала.

#### Литература

1. Давыдов В.И., Максаков М.П. Производство гнутых тонкостенных профилей методом профилирования на роликовых станках. М.: Металлургиздат, 1959, 233с.
2. Изготовление деталей гнутого профиля на автоматических профилировочно-штамповочных линиях. / Руководящий документ РД 37.002.0546-88. М.: НПО НИИТАвтопром, 1988, 307 с.
3. Типалин С.А. Исследование и разработка методики расчета процесса профилирования ленты при локальном формоизменении. / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук М.: МАМИ, 1998. 181 с.
4. Типалин С.А., Симонян В.Б. Изгиб многослойного материала. / Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: ТулГУ, Вып. 1., 2005. с. 149-154.
5. Бондарь В.С., Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф. Вязкопластический изгиб и скручивание листа. М. МГТУ «МАМИ», 2003. 168с.
6. Саушкин Г.Б., Моргунов Ю.А. Электрохимическое нанесение информации на поверхность деталей машин. / Упрочняющие технологии и покрытия. 2009, № 12. с. 45-49.
7. Щедрин А.В., Ульянов В.В., Бекаев А.А., Скоромнов В.М., Ванюшкина М.С., Абрамова Т.Г., Хомякова Н.В., Чихачева Н.Ю. Совершенствование методов комбинированного протягивания тел вращения. / Вестник машиностроения. 2009. № 5. с. 36-40.
8. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А., Гладков В.И., Никитин М.Ю. Исследование обтяжки с растяжением листового материала. / Известия МГТУ "МАМИ". Научный рецензируемый журнал. М., МГТУ "МАМИ", № 1(5), 2008. с. 206-212.
9. Типалин С.А., Плотников А.С. Влияние клевого соединительного слоя на процесс вытяжки листового многослойного материала. / Автомобильная промышленность. 2012, № 6 с. 33-35.
10. Щедрин А.В., Ульянов В.В., Бекаев А.А., Скоромнов В.М., Ванюшкина М.С., Абрамова Т.Г., Хомякова Н.В., Чихачева Н.Ю. Перспективные инструменты для комбинированного протягивания тел вращения. / Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 8. с. 52-55.

#### **Локализованный изгиб и скручивание оцинкованной полосы при формообразовании швеллера**

к.т.н. доц. Типалин С.А.

Университет машиностроения  
(495) 223-05-23 доб. 1113, ti@mami.ru

*Аннотация.* Рассмотрен алгоритм решения задачи профилирования полосы с предварительно выдавленной технологической канавкой концентратором. В ходе формоизменения по данной технологии происходит совместно изгиб в месте локализации и скручивания подгибаемой полки. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* скручивание, неравномерный изгиб, изгибающий момент, оцинкованный лист, упрочненный материал, алгоритм

Наиболее эффективным способом получения профильных изделий является многороликовое профилирование. Сущность процесса профилирования заключается в последовательном изгибе полосового или ленточного материала при прохождении его между несколькими парами вращающихся в противоположных направлениях роликов, форма образующих которых переносится на листовую металл.

Отличительной чертой рассматриваемого технологического процесса является локализация очага пластической деформации при профилировании с помощью технологической канавки. Пластическое формоизменение ограничено и развивается только в предназначенной

для этого области, что позволяет ввести упрощения в инструмент и технологию, значительно снизить энергетические потери. Толщина ленты здесь сокращена в определенной мере в предшествующей операции. Соответствующая клеть гибочной машины оснащена катящимися инденторами, оставляющими за собой дорожки-канавки заданной глубины.

При профилировании ленты в швеллер (рисунок 1) в условиях локализованного формоизменения имеют место одновременно изгиб в области канавки заданной ширины под действием неравномерно распределенного вдоль оси  $z$  изгибающего момента и скручивание подгибаемых полок [1], причем кривизна изгиба и кручение являются функциями координаты, взятой вдоль канавки.

Рассмотрим алгоритм решения поставленной задачи и исходные положения.

В любом поперечном сечении на расстоянии  $z$  от начала координат угол  $\Omega_{z0}(z)$  скручивания полосы и угол локализованного в области канавки изгиба  $\alpha(z)$  равны, т.е.:

$$\Omega_{z0} = \alpha. \quad (1)$$

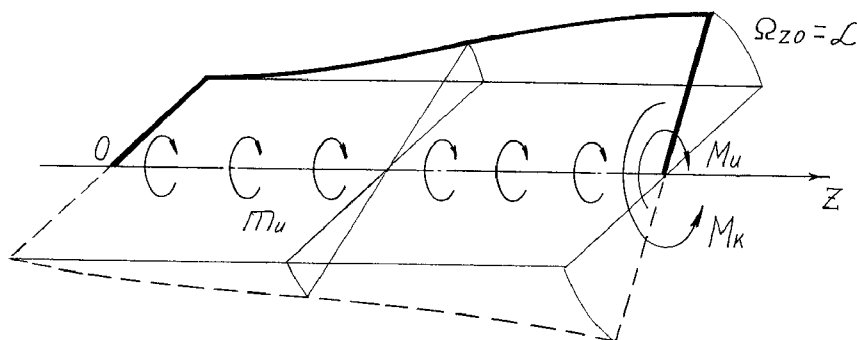


Рисунок 1 – Схема кручения, совмещенная с изгибом

Момент, необходимый для скручивания полосы  $M_k(z)$ , и момент локализованного изгиба  $M_u$  в том же сечении также равны, т.е.

$$M_k = M_u, \quad (2)$$

причем

$$M_u = \int_0^z m_u \cdot dz. \quad (3)$$

Изгибающий момент на единицу размера, взятого вдоль  $z$ , есть функция  $\alpha$ . Вместе с тем угол  $\alpha$  есть функция  $z$ , которая является искомой.

Рассмотрим последовательность решения.

При  $z=0$ ,  $M_k = M_u = 0$ .

На малом расстоянии  $\Delta z = \frac{z_k}{m}$  от начала координат углы  $\Delta \Omega_{z0} = \Delta \alpha$ , крутящий момент

$$\Delta M_k = \Delta M_k(\Delta \Omega_{z0}), \quad (4)$$

изгибающий момент

$$\Delta M_u = \frac{m_u \cdot \Delta z}{2}, \quad m_u = m_u(\Delta \alpha). \quad (5)$$

Вычисление  $\Delta M_k$  и  $\Delta M_u$  при первом заданном значении  $\Delta \Omega_{z0} = \Delta \alpha$  и последующие итерации с варьированием этого значения, чтобы обеспечить равенство  $(\Delta M_k)_1 = (\Delta M_u)_1$  с заданной точностью.

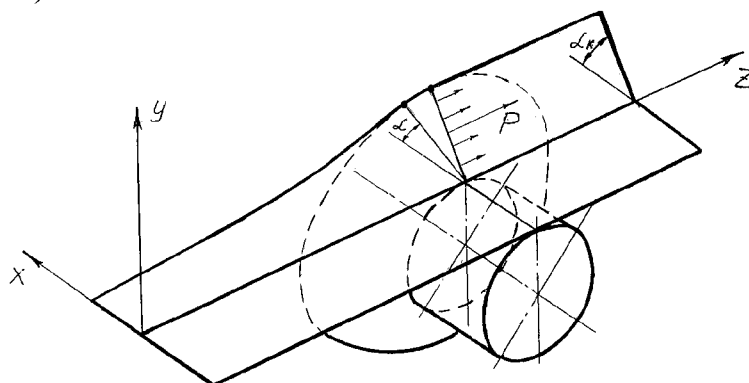
На втором шаге  $z = 2 \cdot \Delta z$ ,  $\alpha = \Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2 = \Omega_{z0}$ . Значение  $\Delta \alpha_2$  подлежит варьиро-

ванию, чтобы обеспечить равенство:

$$M_k(\Delta\Omega_{z0}) = M_n = (\Delta M_n)_1 + m_n \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \cdot \Delta z . \quad (6)$$

На третьем и последующих шагах процесс решения аналогичен.

Полученная таким образом зависимость  $z = f(\alpha)$  представляет собой участок подгибки полки при профилировании ленты с предварительно выдавленными технологическими канавками до ее соприкосновения с формоизменяющим инструментом. Область деформации заготовки, в которой она вступает в контакт с профилировочными роликами, предлагаемая математическая модель не рассматривает. Но, анализируя данные экспериментов, можно считать, что граница внеконтактной и контактной областей находится в том месте, где радиальное волокно срединной поверхности подгибаемой полки совпадает с образующей конической поверхности, отстоящей от поверхности формоизменяющего ролика на половину толщины материала (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Схема профилирования ленты с технологической канавкой**

После контакта подгибаемая полка изгибается по форме профилировочного ролика. Исходя из этого, возможно численным расчетом получить зависимость изменения угла подгибаемой полки швеллера на всем участке деформации.

Представленная математическая модель может быть решена, если известна интенсивность накопленной деформации  $\epsilon_0$ , возникшая при выдавливании технологической канавки катящимся индентором. Она может быть определена экспериментально по методу твердости или рассчитана аналитически.

Мощность деформации, развиваемая моментом  $M_k$  (2) скручивания полки швеллера на угловой скорости  $\dot{\omega}_L$  ее поворота:

$$N = 2 \cdot M_k \cdot \dot{\omega}_L . \quad (7)$$

Угловая скорость поворота полки равна угловой скорости  $\dot{\omega}_L$  поворота образующей  $L$  конической поверхности ролика в плоскости, параллельной плоскости, содержащей оси роликовой пары. Окружная скорость конца образующей (в точке  $A$ ), при ее вращении относительно точки  $B$ , находящейся в вершине конической поверхности, рисунок 3,

$$v_{\theta L} = v_{\theta} \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha , \quad (8)$$

где:  $v_{\theta} = \dot{\omega} \cdot R_1$ , так что:

$$\dot{\omega}_L = \frac{v_{\theta L}}{L} = \frac{v_{\theta} \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha}{L} ,$$

или

$$\dot{\omega}_L = \frac{\dot{\omega} \cdot R_1 \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha}{L} . \quad (9)$$

Для проверки предлагаемой методики расчета произведено экспериментальное исследование процесса формообразования швеллера из полосы с предварительно выдавленными технологическими канавками.

Для исследований использовалась оцинкованная полоса из малоуглеродистой стали 08кп толщиной 0,64 мм.

Испытание образцов из данных полос на одноосное растяжение позволило определить их механические свойства и коэффициенты кривой упрочнения для аппроксимации зависимостью  $\sigma = A \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$ .

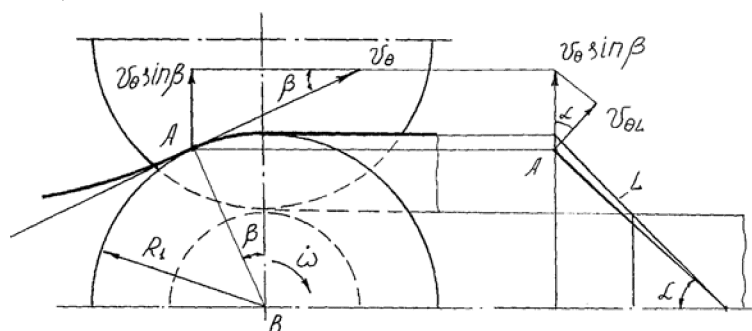


Рисунок 3 – Силы, действующие при профилировании

Таблица 1

s мм	$\sigma_T$ МПа	$\sigma_B$ МПа	$\delta$ %	A МПа	n	$\varepsilon_0$	$r_a$
0,64	217	401	43	704,2	0,28	0,015	0,91

Практический интерес представляет определение интенсивности деформации при относительной глубине внедрения  $\frac{\Delta h}{h_0}$  равной 0,30. Такая величина относительной глубины

внедрения является оптимальной, так как в этом случае изгиб происходит только в зоне канавки. Для данной глубины канавки интенсивность деформации составляет приблизительно 0,24 [1].

Из листового материала на гильотинных ножницах отрезалась полоса шириной 36 мм. Затем на одной поверхности образца наносились поперечные риски с шагом 1 мм. Разметка шага рисунок производилась с точностью 0,05 мм.

Размеченная полоса прокатывалась в профилировочной клети между двумя роликами. В процессе прокатывания в полосе выдавливались две продольные дорожки-канавки с предварительно размеченной стороны. После этого полоса поступала во вторую клеть, где происходила подгибка боковых краев полосы на заранее заданный угол. Величина подгибаемого угла обеспечивалась формой роликов и составляла 30° и 45°. Для каждого сечения полосы измеряли угол подгибки полки швеллера на всем участке деформации. На рисунках 4 полученные экспериментальные данные сопоставлены с расчетными.

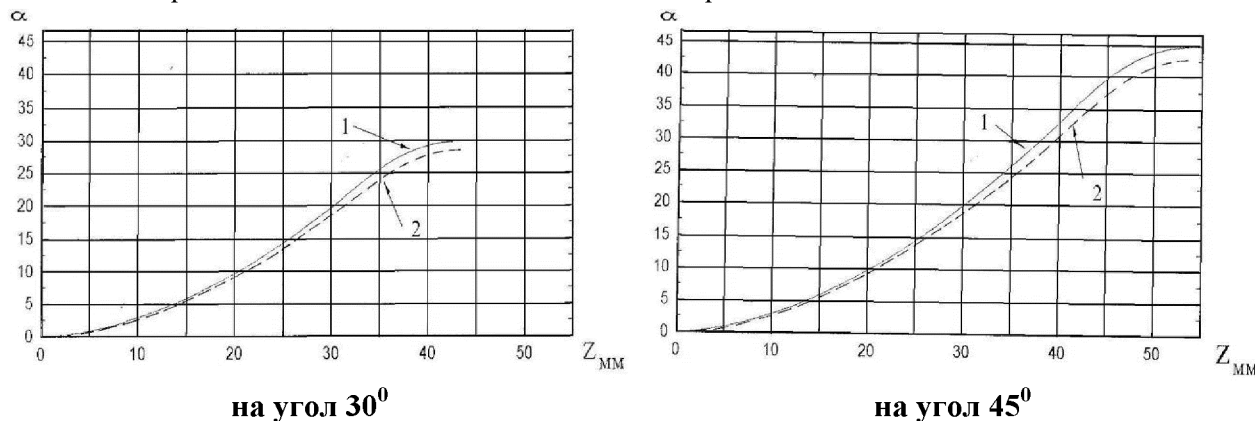


Рисунок 4 – Изменение угла подгибки полки в продольном направлении на контактном и внеконтактном участках деформации при изгибе:  
1 – результаты расчета; 2 – результаты эксперимента

Небольшое отклонение результатов можно объяснить упругой деформацией, возникающей в образце в процессе профилирования. Графики для углов изгиба  $30^\circ$  и  $45^\circ$  имеют различную протяженность деформированного участка. Расчеты на основании предполагаемой математической модели в основном соответствуют эксперименту.

Измерения участков на контуре поперечного сечения, не подлежащих пластическому формоизменению, показали, что они сохраняют плоскостность как в контактной, так и во внеконтактной области. Пространственная форма подгибаемой полки профиля может быть представлена как часть скручиваемой полосы (рисунок 2) с переменным по длине кручением.

#### **Заключение**

Приведенный в статье алгоритм нахождения формы внеконтактной области формоизменения в процессе профилирования может быть применен не только для сплошного материала [2], но и для многослойных листовых полос [3-5]. Данная методика приемлема и для формоизменения более сложных форм деталей. Если внеконтактная область образуется не в профилировочном стане, а в штампе, то необходимо учитывать трение с инструментом [6, 7].

#### **Литература**

1. Типалин С.А. Исследование и разработка методики расчета процесса профилирования ленты при локальном формоизменении. / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук М.: МАМИ, 1998. 181 с.
2. Бондарь В.С., Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф. Вязкопластический изгиб и скручивание листа. М. МГТУ «МАМИ», 2003. 168 с.
3. Типалин С.А. Гладков В.И., Власов А.И., Никитин М.Ю. Моделирование конструкции клапанной крышки двигателя на основе применения клеевых соединений. / Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. М., МГТУ «МАМИ», № 1 (5), 2008. с. 201-206.
4. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Никитин М.Ю. Листовой демпфирующий материал для кузовных деталей. Свойства при сдвиговой деформации. / Автомобильная промышленность, 2010, № 10, с. 39-40.
5. Типалин С.А., Плотников А.С. Влияние клеевого соединительного слоя на процесс вытяжки листового многослойного материала. / Автомобильная промышленность, 2012, № 6, с. 33-35.
6. Бодунов М.А., Бодунов Д.М., Исаев В.П., Кийко Л.К. О растекании тонкого пластического слоя. / Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. М., МГТУ «МАМИ», 2010. № 1. с. 181-185.
7. Петров М.А., Петров П.А., Калпин Ю.Г. Численное исследование трения при высадке с радиальным выдавливанием деталей типа «стержень с утолщением» из алюминиевого сплава АД1. / Известия МГТУ «МАМИ», № 1 (13), 2012, с. 200-210.

### **Экспериментальное исследование процесса выдавливания технологической канавки в оцинкованной полосе**

к.т.н. доц. Типалин С.А.

Университет машиностроения  
(495) 223-05-23 доб. 1113, ti@mami.ru

*Аннотация.* Произведено исследование по определению накопленной деформации в зоне выдавленной роликом индентором технологической канавки. Выявлены особенности распределения интенсивности деформации. Сделана оценка осредненных по сечению дна канавки значений интенсивности деформации.

*Ключевые слова:* профилирование, выдавливание канавки, индентор, ролики, изгибающий момент, оцинкованный лист, упрочненный материал, упрочнение металла.

Необходимость выдавливания в ленте технологической дорожки (канавки) катящимся