

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ "МАМИ"

03

На правах рукописи

№ 03.00.00

Типалин Сергей Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
ПРОЦЕССА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛЕНТЫ
ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ

Специальность 05.03.05 - процессы и машины
обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1998

Работа выполнена на кафедре "Кузовостроение и обработка давлением" Московского Государственного Технического Университета "МАМИ".

Научный руководитель - проф., д.т.н., заслуженный деятель науки и техники РФ, академик РАПК Матвеев А.Д.

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор	Ковалев В.Г.
к.т.н., профессор	Шестаков Н.А.

Ведущее предприятие - АО "Москвич"

Защита диссертации состоится "17" декабря 1998 г. в "14" часов на заседании специализированного совета К063.49.03 при Московском Государственном Техническом Университете "МАМИ" по адресу: 105839, Москва, Б.Семеновская ул., д. 38.

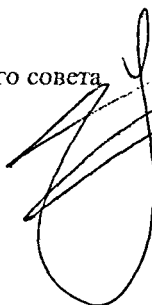
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ "МАМИ"

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан "16" ноября 1998 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент

А.Д.Максимов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в различных отраслях промышленности находят все большее применение изделия в виде тонкостенных профилей различного сечения. Основными преимуществами таких изделий являются высокие прочность и жесткость при незначительном весе. Наиболее эффективным способом получения профильных изделий является многороликовое профилирование.

Преимуществами многороликового профилирования по сравнению с другими методами получения тонкостенных профилей являются высокая производительность, отсутствие необходимости нагрева металла, высокое качество изделий и возможность получения деталей из высокопрочных сплавов. Однако, недостаточная изученность процесса приводит к значительным энергетическим потерям, завышению мощности и занимаемых площадей под оборудование. Также в процессе профилирования имеет место бесполезная трата энергии на избыточное формоизменение, связанное с пластическим изгибом и последующим устранением искривления - спрямлением элементов контуров сечения. При этом на поверхностях контакта ленты с роликами развиваются значительные силы трения, усугубляемые тем обстоятельством, что окружные скорости различны на соответствующих поверхностях роликов. Поэтому здесь вместе с энергетическими затратами на преодоление сил трения происходит снижение качества поверхности профиля. В результате потерь на избыточное, неуправляемое пластическое формоизменение и трение КПД современных многороликовых гибочных машин не превышает 10%.

Предлагаемый метод локализации области изгиба в процессе профилирования ленты на многороликовой гибочной машине во многом устраняет указанные недостатки традиционной технологии и делает необходимым внести коррективы в вопросы расчета силовых и деформационных параметров и конструирования инструмента и оборудования.

Цель работы - исследование процесса профилирования ленты (полосы) в условиях локального формоизменения, создание новой методики расчета технологических параметров и малогабаритной опытно-производственной профилегибочной машины.

Методика исследования. Теоретическое исследование базируется на численном решении системы уравнений теории пластического течения упрочняющегося по деформации изотропного несжимаемого металла. При вычислении накопленной деформации использован прямой и обратный переход от Эйлеровых координат к Лагранжевым.

В экспериментальном исследовании применены метод координатной сетки и метод определения накопленной деформации по способу Дея. Для оценки деформационных и силовых параметров процесса профилирования создана экспериментальная установка.

Научная новизна. Впервые исследован процесс локализованного формоизменения ленты, расчетная схема которого представляет совмещение изгиба и кручения, разработана методика расчета технологических параметров процесса профилирования в условиях локального формоизменения. Впервые получены экспериментальные данные о характере распределения деформации при выдавливании канавки катящимся индентором. Научной новизной обладают также экспериментальные данные о параметрах формоизменения внеконтактной части профилируемой полосы.

Практическую ценность имеют:

- научно обоснованная методика расчета технологических параметров профилирования ленты;
- рекомендации по разработке формообразующего инструмента обеспечивающего снижение потерь на избыточное формоизменение и трение;
- малогабаритная опытно-производственная профилегибочная машина.

Апробация работы . Результаты исследования доложены на Международной научно-технической конференции "100 лет Российскому автомобилю. Промышленность и высшая школа" Москва, МАМИ 1996 г., на Всероссийской молодежной научной конференции "Гагаринские чтения" Москва, МАТИ-РГТУ в 1996, 1997, 1998гг., на Международном научно-техническом симпозиуме Орел, ОрелГТУ в 1997г., а также на заседаниях кафедры "КиОД" МГТУ"МАМИ".

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы . Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и приложений. Работа выполнена на

161 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 113 наименований. Общий объем работы 181 страница.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, изложены особенности процесса профилирования. Раскрыто краткое содержание глав диссертации.

В первой главе представлен анализ литературы, содержащей исследования методик расчетов силовых и деформационных параметров процесса профилирования. Отмечено, что процессам профилирования полосы посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных работ известных ученых: К.Н.Богоявленского, А.А.Бурькина, Ш.Гелеи, В.М.Гребеника, Г.Я.Гуна, В.И.Давыдова, М.Е.Докторова, Б.Д.Жуковского, М.А.Лейченко, М.В.Маламуда, П.И.Полухина, Г.А.Смирнова-Аляева, И.С.Тришевского, А.П.Чекмарева, Р.Е.Ангел, G.Ditges, G.Makelt и др. Но остались не раскрытыми многие явления, сопровождающие профилирование, а предлагаемые методики не всегда могут быть использованы для практических расчетов технологических параметров данного процесса. В большинстве решений не учитывается фактический характер напряженно-деформированного состояния материала. Скручивание полки, сопровождающее изгиб, оставлено без внимания. В расчетные зависимости обычно вводятся эмпирические поправочные коэффициенты, что затрудняет их использование. Локализованный изгиб полосы в области технологической канавки-концентратора не рассмотрен. Поскольку в процессе формоизменения полосы изгиб полки сопровождается скручиванием, проанализирована литература по изгибу и скручиванию.

Рассмотрены работы по изгибу В.С.Бондаря, О.Гофмана, В.И.Ершова, Б.П.Звороно, Н.Н.Малинина, А.Д.Матвеева, Е.Н.Мошина, Е.А.Попова, И.П.Ренне, Р.Хилла, Д.Цоя и других авторов. Наиболее изучен круговой изгиб листа из упрочняющегося и неупрочняющегося в процессе деформации материала под действием изгибающего момента. Влияние накопленной в исходном состоянии

листа деформации на параметры последующего изгиба не затрагивается.

Решение задачи о равномерном упругопластическом и пластическом скручивании стержня прямоугольного сечения из неупрочняющегося и упрочняющегося материала представлены в работах Н.И.Безухова, В.А.Колгадина, Р.М.Кулиева, Б.Курманбаева, Н.А.Матвеевой, А.Надаи, Л.И.Овсиенко, В.Я.Осадчий, К.А.Сариджанова, Б.О.Сен-Венана, Р.Хилла и других ученых. Неравномерное скручивание не исследовано.

На основании выполненного анализа в диссертации поставлены следующие задачи:

1. Создать математическую модель процесса профилирования полосы (ленты) в швеллер, полагая, что в процессе формоизменения полосы одновременно имеют место неравномерные в продольном направлении локальный изгиб в области канавки и скручивание полок.

2. Оценить допустимость принятых в теоретическом исследовании упрощающих предпосылок сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

3. Экспериментально исследовать процесс выдавливания технологической канавки.

4. Разработать методику проектирования инструмента и техпроцесса многороликовой гибки полосы в условиях локализованного формоизменения.

5. Создать малогабаритную опытно-производственную профилсгибочную машину.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию профилирования полосы в условиях локализованного изгиба.

В рассматриваемом формоизменении имеют место одновременно изгиб в области технологической канавки заданной ширины и скручивание подгибаемых полок, причем кривизна изгиба и кручение являются функциями координаты, взятой вдоль канавки.

Прията цилиндрическая система координат ρ, θ, z , в которой ось z - направлена вдоль канавки.

Приняты допущения: кривизна изгиба в рассматриваемом элементе, имеющем размер Δz в направлении оси z и в рассматриваемое мгновение, постоянна по θ , материальные плоскости $\rho-\theta$ в процессе деформации остаются плоскими, скорость

деформации в направлении z равна нулю, изменение кривизны по этой координате не принимается во внимание, металл несжимаемый, изотропный, упрочняющийся по деформации,

$$\sigma = A(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n, \quad (1)$$

где ε_0 - деформация, воспринятая металлом в процессе выдавливания капавки.

Для цилиндрического, кругового изгиба листа компоненты вектора скорости движения материальной точки имеют вид:

$$v_\theta = \dot{\alpha} \frac{\theta}{\alpha} \rho; \quad v_\rho = -\frac{\dot{\alpha}}{2\alpha} \frac{\rho^2 + \rho_c^2}{\rho}; \quad v_z = 0. \quad (2)$$

где α - угол изгиба, $\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} = \text{const}$,

ρ_c - радиус геометрической поверхности, на которой $\frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} = 0$.

Компоненты $\dot{\varepsilon}_\theta$ и $\dot{\varepsilon}_\rho$ скорости деформации:

$$\dot{\varepsilon}_\rho = -\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{\dot{\alpha}}{2\alpha} \left(\frac{\rho_c^2}{\rho^2} - 1 \right). \quad (3)$$

Радиус кривизны геометрической дуги, длина которой остается неизменной,

$$\rho_{cl} = \frac{l}{\alpha} = \frac{l}{\dot{\alpha} t}; \quad (4)$$

волокно, занявшее положение этой дуги, имеет исходную длину l .

Расстояние между ρ_{cl} и внутренним радиусом r

$$\rho_{cl} - r = e = f(\alpha) \quad \text{или} \quad r = \frac{l}{\dot{\alpha} t} - e \quad (5)$$

Скорость движения внешнего вогнутого слоя листа

$$v_r = \frac{dr}{dt} = -\frac{l}{\alpha^2} \dot{\alpha} - \dot{e}, \quad \text{где} \quad \dot{e} = \frac{de}{dt}. \quad (6)$$

Преобразование равенства (2) с учетом выражения (6) дает:

$$\rho_c^2 = \frac{l^2}{\alpha^2} - e^2 + 2\alpha \frac{\dot{e}}{\dot{\alpha}} \left(\frac{l}{\alpha} - e \right) = r(r + 2e) + 2r\alpha \frac{\dot{e}}{\dot{\alpha}}. \quad (7)$$

Связь между текущей координатой ρ и начальной $y = kS_0$ вытекает из геометрического соотношения

$$\rho^2 = 2y(r + e) + r^2 = 2y \frac{l}{\alpha} + \left(\frac{l}{\alpha} - e \right)^2, \quad (8)$$

тогда толщина листа

$$S = R - r = \sqrt{2S_0(r + e) + r^2} - r. \quad (9)$$

В сечении плоскостью z - ρ имеют место три области:

- область удлинения волокон во время всего процесса деформации;
- область укорочения волокон;
- область знакопеременной деформации, в которой волокна переходят из зоны $\rho < \rho_c$, где они укорачиваются, в зону $\rho > \rho_c$, где подвергаются удлинению.

В текущих координатах границы знакопеременной области:

$$\sqrt{2r\left(e + \alpha \frac{\dot{e}}{\dot{\alpha}}\right) + r^2} \leq \rho \leq \sqrt{S_0(r+e) + r^2}. \quad (10)$$

Время t_y , в течении которого волокно укорачивалось, определяется из уравнений

$$\dot{\alpha}(e \dot{e}) t_y^2 + (e^2 \alpha - e \dot{e}) t_y + \ell(kS_0 - e) = 0, \quad 0 \leq t_y \leq t \quad (11)$$

Интенсивности деформации

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^t |\dot{\varepsilon}_\rho| dt. \quad (12)$$

численно вычисляется для каждой области.

Энергетическое условие пластичности имеет вид:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma, \quad r \leq \rho \leq \rho_c, \quad (13)$$

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma, \quad \rho_c \leq \rho \leq R. \quad (14)$$

Поскольку касательные напряжения отсутствуют, уравнение

$$\text{равновесия имеет вид:} \quad \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0 \quad (15)$$

Подстановка в формулу (15) выражений (13-14) и (1) даст:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = -\frac{2A}{\sqrt{3}\rho} (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n, \quad r \leq \rho \leq \sqrt{2r\left(e + \alpha \frac{\dot{e}}{\dot{\alpha}}\right) + r^2}; \quad (16)$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = \frac{2A}{\sqrt{3}\rho} (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n, \quad \sqrt{2r\left(e + \alpha \frac{\dot{e}}{\dot{\alpha}}\right) + r^2} \leq \rho \leq R. \quad (17)$$

Численное интегрирование выражений (16) и (17) в выше указанных пределах даст распределение радиальных напряжений по толщине листа. Подстановка этого результата в (13) и (14) позволяет получить значение тангенциальных напряжений, возникающих при изгибе листа.

Окружная сила и изгибающий момент на единицу длины канавки:

$$P = \int_r^R \sigma_\theta d\rho, \quad m_u = \int_r^R \sigma_\theta (\rho - \rho_u) d\rho \quad (18)$$

где $\rho_u = r + S/2$ - координата центра тяжести сечения.

В процессе расчета параметр ϵ подлежит варьированию, чтобы обеспечить нулевое значение продольной силы (18).

При скручивании полосы относительно продольной оси z_0 ее срединный слой превращается в винтовой, рис.1. Геометрию удобно отнести к этому слою. Какое-либо продольное волокно слоя длиной r_0 превращается в винтовое длиной ℓ . Вдоль каждого винтового волокна ведется отсчет координаты z рассматриваемой материальной точки А. Поперечные волокна длиной b с начальной длиной b_0 , поворачиваясь относительно оси z_0 , остаются прямыми и ортогональными винтовым волокнам. Вдоль каждого ведется отсчет координаты ρ , $0 \leq \rho \leq b$, причем координате ρ отвечает начальная координата ρ_0 .

При скручивании всей полосы на угол $\Omega_{z_0}^k$ поперечное волокно, пересекающее осевое волокно в точке z_0 , поворачивается на угол Ω_{z_0} относительно неподвижного волокна, $z_0=0$. Так кручение осевого волокна,

$$\omega_{z_0} = \frac{d\Omega_{z_0}}{dz_0}. \quad (19)$$

Относительный поворот близких друг к другу поперечных волокон вокруг оси z_0 на угол $d\Omega_{z_0}$, рис. 2, вызывает их скручивание на угол Ω_ρ , причем этот угол определяет и наклон продольного волокна z в рассматриваемой точке А,

$$\operatorname{tg} \Omega_\rho = \frac{d\Omega_{z_0} \rho}{dz_0} = \omega_{z_0} \rho, \quad dz_0 = dz \cos \Omega_\rho, \quad \Omega_\rho = \operatorname{arctg} \omega_{z_0} \rho. \quad (20)$$

Относительный поворот на угол $d\Omega_{z_0}$ вызывает скручивание как волокна dz_0 , так и волокна dz . Но скручивание волокна dz вызывает проекция

$$d\Omega_z = d\Omega_{z_0} \cos \Omega_\rho \quad (21;$$

вектора $d\vec{\Omega}_{z_0}$ на касательную к z (другая проекция, равная $d\Omega_{z_0} \sin \Omega_\rho$, вызывает изгиб волокна). И кручение волокна z

$$\omega_z = \frac{d\Omega_z}{dz} = \omega_{z_0} \cos^2 \Omega_\rho. \quad (22)$$

Вместе с тем, кручение поперечного волокна в той же точке

$$\omega_\rho = \frac{d\Omega_\rho}{d\rho} = \frac{d(\operatorname{arctg} \omega_{z_0} \rho)}{d\rho} = \frac{\omega_{z_0}}{1 + \omega_{z_0}^2 \rho^2} = \omega_{z_0} \cos^2 \Omega_\rho. \quad (23)$$

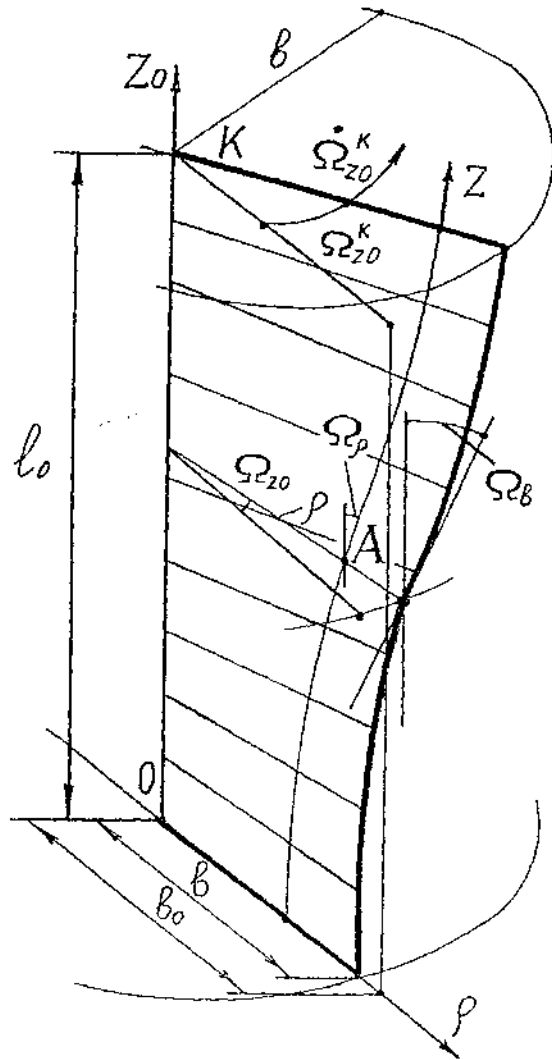


Рис. 1. Схема скручивания тонкой полосы

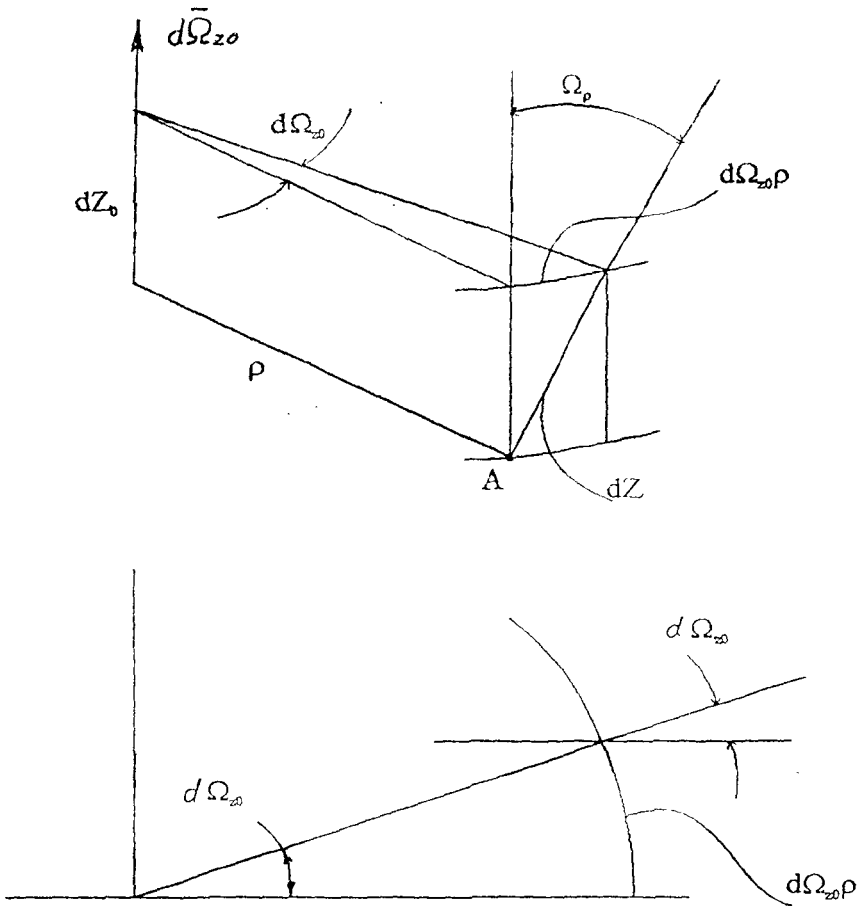


Рис. 2. Схема поворота волокон полосы

Таким образом, кручение $\omega_z = \omega_\rho$. (24)

Длина малого продольного волокна изменяется согласно равенству (20); его деформация и скорость деформации

$$\varepsilon_z = \ln \frac{dz}{dz_0} = \ln \frac{1}{\cos \Omega_\rho} = \ln \sqrt{1 + \omega_{z0}^2 \rho^2}, \quad \dot{\varepsilon}_z = \frac{d\varepsilon_z}{dt} = \frac{\omega_{z0} (\dot{\omega}_{z0} \rho + \omega_{z0} \dot{\rho})}{1 + \omega_{z0}^2 \rho^2}, \quad (25)$$

$$\text{где скорость кручения} \quad \dot{\omega}_{z0} = \frac{d\omega_{z0}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\Omega_{z0}}{dz_0} \right) = \frac{d\dot{\Omega}_{z0}}{dz_0} \quad (26)$$

скорость движения материальной точки в направлении поперечного волокна $\dot{\rho} = \frac{d\rho}{dt}$.

Поскольку их кручения равны (24) между собой, скорости кручения

$$\dot{\omega}_z = \dot{\omega}_\rho = \frac{d\omega_\rho}{dt} = \frac{d\omega_{z0}}{dt} \cos^2 \Omega_\rho + \omega_{z0} \frac{d}{dt} (\cos^2 \Omega_\rho) = \frac{\dot{\omega}_{z0} - 2\omega_{z0} (\dot{\omega}_{z0} \rho + \omega_{z0} \dot{\rho})}{1 + \omega_{z0}^2 \rho^2}. \quad (27)$$

Приращения окружных скоростей точек, взятых на расстоянии y от срединного слоя, есть произведения $d\dot{\Omega}_z y$, $d\dot{\Omega}_\rho y$, и угловые скорости волокон, отстоящих на расстояние y от срединной поверхности, равны произведениям $\dot{\omega}_z y$ и $\dot{\omega}_\rho y$. Они имеют смысл угловой скорости деформации точки, взятой на расстоянии y от срединного слоя $\dot{\varepsilon}_{z\rho} = \dot{\varepsilon}_{\rho z} = \dot{\omega}_z y = \dot{\omega}_\rho y$. (28)

Удлинение винтовых волокон под действием продольных растягивающих напряжений приводит к возникновению поперечных сжимающих напряжений σ_ρ . Но если угол наклона крайнего волокна $\rho = b$, $\Omega_\rho = \Omega_b < 45^\circ$, эти напряжения малы по сравнению с продольными и их воздействием на формоизменение полосы можно пренебречь. Тогда из трех нормальных напряжений только продольное не равно нулю, $\sigma_z \neq 0$, $\sigma_\rho = 0$, $\sigma_n = 0$. Следовательно

$$\dot{\varepsilon}_\rho = \dot{\varepsilon}_n = \frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_z, \quad \varepsilon_\rho = \varepsilon_n = \ln \frac{d\rho}{d\rho_0} = \ln \frac{h}{h_0} = \frac{1}{2} \varepsilon_z = -\frac{1}{2} \ln \sqrt{1 + \omega_{z0}^2 \rho^2} \quad (29)$$

Начальные и текущие координаты связаны между собой,

$$d\rho_0 = (1 + \omega_{z0}^2 \rho^2)^{1/4} d\rho, \quad h_0 = (1 + \omega_{z0}^2 \rho^2)^{1/4} h. \quad (30)$$

Интенсивность скорости деформации при наличии равенства (30) имеет вид:

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_z^2 + \frac{4}{3} \dot{\varepsilon}_{\rho z}^2}; \quad (31)$$

интеграл

$$\varepsilon = \int \dot{\varepsilon} dt, \quad (32)$$

взяв численно.

Крутящий момент и продольная сила в рассматриваемом сечении полосы,

$$M = 4 \int_0^h \int_0^b \sigma_z dy d\rho \rho \sin \Omega_\rho + 4 \int_0^h \int_0^b \sigma_{z\rho} dy d\rho y \cos \Omega_\rho, \quad (33)$$

$$P = 4 \int_0^h \int_0^b \sigma_z dy d\rho \rho \cos \Omega_\rho. \quad (34)$$

Здесь напряжения

$$\sigma_z = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dot{\varepsilon}_z, \quad \sigma_{z\rho} = \frac{2}{3} \frac{\sigma}{\varepsilon} \dot{\varepsilon}_{z\rho}, \quad \sigma = A(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n. \quad (35)$$

Если принять, что полоса относительно тонкая, $h_0 / b_0 \leq 0,05$;

$$\operatorname{tg} \Omega_\rho(h) \leq \frac{\pi}{4}, \quad \Omega_\rho(h) \leq 0,67 \text{ рад} (38^\circ), \quad \varepsilon_3(h) \leq 0,24,$$

$\varepsilon_h(b) \leq [0,12]$, $h / h_0 \geq 0,9$, $b / b_0 \geq 0,95$. В области $b \geq \rho \geq h_0$ угловая скорость деформации $\dot{\varepsilon}_{z\rho}$ мала по сравнению со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_z$.

Тогда имеют место упрощения: $\rho = \rho_0$, $h = h_0$, $\dot{\varepsilon}_z = \dot{\varepsilon}$; $\varepsilon_3 = \varepsilon$;

$$\sigma_z = \sigma = A(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n = A \left(\varepsilon_0 + \ln(1 + \omega_{z0}^2 \rho^2) \right)^{n/2}. \quad (36)$$

Крутящий момент для полосы шириной $2b$

$$M = 2 \int_0^b A \left(\varepsilon_0 + \ln(1 + \omega_{z0}^2 \rho^2) \right)^{n/2} \rho \frac{\omega_{z0} \rho d\rho}{(1 + \omega_{z0}^2 \rho^2)^{1/2}}, \quad (37)$$

продольная сила

$$P = 2 \int_0^b A \left(\varepsilon_0 + \ln(1 + \omega_{z0}^2 \rho^2) \right)^{n/2} h \frac{d\rho}{(1 + \omega_{z0}^2 \rho^2)^{1/2}}. \quad (38)$$

Так как при профилировании ленты имеют место одновременно локализованный изгиб в области канавки и скручивание полки, то в решении две расчетные схемы связаны между собой, рис. 3.

Алгоритм решения.

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:

$$\Omega_{z0} = \alpha. \quad (40)$$

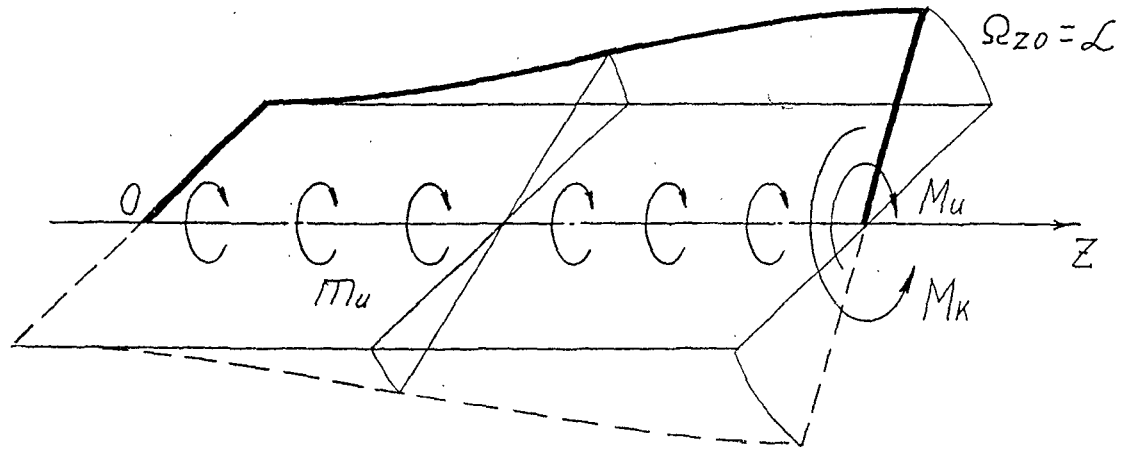


Рис. 3. Схема кручения совмещенная с изгибом

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

$$M_k = M_u, \text{ причем } M_u = \int_0^z m_u dz \quad (41)$$

Изгибающий момент на единицу размера, взятого вдоль z , есть функция α (2.28); вместе с тем угол α есть функция z , которая является искомой.

Последовательность рецессии. При $z=0$, $M_k = M_u = 0$.

На малом расстоянии $\Delta z = \frac{z_k}{m}$ от начала координат малые углы $\Delta\Omega_{z_0} = \Delta\alpha$, крутящий момент

$$\Delta M_k = \Delta M_k(\Delta\Omega_{z_0}), \quad (42)$$

$$\text{изгибающий момент } \Delta M_u = \frac{m_u \Delta z}{2}, \quad m_u = m_u(\Delta\alpha). \quad (43)$$

Вычисление ΔM_k и ΔM_u при первом заданном значении $\Delta\Omega_{z_0} = \Delta\alpha$ и последующие итерации с варьированием этого значения, чтобы обеспечить равенство $(\Delta M_k)_1 = (\Delta M_u)_1$ с заданной точностью.

На втором шаге $z = 2\Delta z$, $\alpha = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 = \Omega_{z_0}$.

Значение $\Delta\alpha_2$ подлежит варьированию, чтобы обеспечить равенство:

$$M_k(\Delta\Omega_{z_0}) = M_u = (\Delta M_u)_1 + m_u(\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2)\Delta z \text{ и г.д.} \quad (44)$$

Полученная таким образом зависимость $z = f(\alpha)$ представляет собой внеконтактный участок подгибки полки при профилировании ленты с предварительно выдавленными технологическими канавками.

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.

Мощность деформации, развиваемая моментом M_k (41) скручивания полки швеллера при угловой скорости $\dot{\omega}_L$ ее поворота

$$N = 2M_k \dot{\omega}_L. \quad (45)$$

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 при ее вращении относительно точки, находящейся в вершине конической поверхности профилировочного ролика,

$$v_{\theta L} = v_{\theta} \sin \beta \cos \alpha, \quad \text{где } v_{\theta} = \dot{\omega} R_1 \quad (46)$$

$\dot{\omega}$ и R_1 - скорость вращения ролика и его максимальный радиус.

$$\text{Отсюда} \quad \dot{\omega}_L = \frac{v_{\text{вл.}}}{L} = \frac{\dot{\omega} R_1 \sin \beta \cos \alpha}{L}. \quad (47)$$

Численно решая систему уравнений теории течения, получаем распределения тангенциальных и радиальных напряжений по толщине изгибаемого листа для различной кривизны и предварительно накопленной деформации ϵ_0 .

Уменьшение толщины материала в процессе выдавливания технологической канавки приводит к ослаблению данного сечения листа. В связи с этим встает вопрос об дальнейшем утонении этого сечения в процессе круглого пластического изгиба.

Полученные данные расчетов показали, что с увеличением ϵ_0 и уменьшением показателя степени кривой упрочнения материала, относительное утонение листа при изгибе снижается. Кроме того предварительное упрочнение материала приведет к изменению величины изгибающего момента.

Приведены расчетные графики изменения относительного изгибающего момента от относительной кривизны для различных значений глубины канавки. Значение накопленной в листе деформации ϵ_0 , возникающей при выдавливании канавки на различную глубину, определялось экспериментально. Из графиков видно, что чем больше накопленная в листе деформация, тем меньше влияет относительная кривизна на изгибающий момент. Численно получены данные об изменении формы скручиваемой полки.

Анализ результатов расчетов позволяет сделать вывод, что ширина подгибаемой полки и толщина профилируемой ленты влияют на величину внеконтактной области деформации. При увеличении размеров полки швеллера величина внеконтактной зоны деформации возрастает. А при увеличении толщины h_0 профилируемой заготовки происходит уменьшение внеконтактной зоны деформации.

Представлены кривые, отражающие влияние угла скручивания полки, ее ширины и толщины на крутящий момент. Увеличение этих геометрических параметров полки приводит к увеличению момента.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования процесса профилирования ленты с предварительно выдавленными технологическими канавками. Приведены методики и результаты экспериментов, отражающие зависимость крутящего момента на

ролик с индентором для выдавливания в ленте технологической канавки различной глубины.

Для определения накопленной деформации и изменения свойств материала в зоне канавки использовался метод твердости Деля. Замеры твердости проводились на приборе ИМТ-3. В процессе испытания получено распределение микротвердости для различной относительной глубины канавки. По экспериментальным данным представлена зависимость осредненного по площади сечения значения твердости и интенсивности деформации в зоне канавки.

Экспериментальные данные подтвердили результаты расчета о слабом влиянии угла изгиба (кривизны) на изгибающий момент при изгибе предварительно упрочненного листа.

Для экспериментального определения деформации подгибаемой полки в процессе профилирования применен метод координатной сетки. По результатам эксперимента получены данные, отражающие изменение угла подгибаемой полки в продольном направлении на контактном и внеконтактном участках деформации.

Результаты экспериментов подтвердили принятое в теоретическом решении положение, что процесс формоизменения полосы во внеконтактной области представляет сочетание локализованного в канавке изгиба и скручивания полки при переменном продольном кручении.

В четвертой главе рассмотрена технология профилирования ленты в условиях локализации формоизменения и произведен анализ энергетических потерь на трение заготовки с профилировочными роликами. Предложена новая конструкция инструмента для профилирования ленты с технологическими канавками, которая позволяет не только снизить потери на избыточное трение, но и является более простой в изготовлении.

В работе представлена малогабаритная опытно-производственная многороликовая профилегибочная машина новой конструкции. Машина предназначена для экспериментальных исследований процесса профилирования и производства различных профилей из тонколистового металла, а также для использования в учебном процессе при проведении практических занятий и лабораторных работ.

Опытно-производственная профилегибочная машина включает в себя рабочую часть, привод, электродвигатель, основание.

При расчете кинематических параметров была принята схема, в которой вращение от вала электродвигателя передается на профилировочные ролики через клиноременную передачу, планетарный редуктор и цепную передачу. Передаточное отношение кинематической схемы $i=65$.

Рабочая часть машины состоит из двух, боковин на которых смонтированы остальные ее детали и узлы. Процесс формоизменения ленты происходит в двенадцати клетях. Демонтаж любой из клеток производится независимо от соседних. Клеть представляет собой узел, состоящий из двух неподвижных осей, на которых с возможностью вращения на подшипниках установлены ролики, конструкция которых существенно снижает трение о профилируемый материал. Оси стянуты между собою винтами, регулирующими межосевое расстояние и давление профилировочных валков на ленту. В конструкции машины предусмотрены также узлы боковых роликов, осуществляющих при необходимости дополнительную подгибку элементов профиля. Для изменения натяжения цепей в конструкцию машины введены натяжные устройства.

При работе машины профилируемый материал в виде полосы подается в первую пару валков, которые захватывают его и выдавливают на нем в месте последующего изгиба канавки. Затем материал перемещается в формообразующие клетки и производится его изгиб между роликами.

Машина компактна, имеет небольшую массу, может легко транспортироваться, проста в эксплуатации и обслуживании.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Изучение литературы о профилировании ленты (полосы) из тонколистового материала показало, что необходимо дальнейшее исследование процесса и совершенствование методов расчета деформационных и силовых параметров формоизменения, направленные на снижение энергозатрат и улучшение технологических и конструкционных показателей.

2. Впервые показано, что в процессе профилирования имеют место одновременно изгиб и скручивание подгибаемой полки.

3. Впервые выполнено решение задачи о профилировании ленты, в котором принята расчетная схема формоизменения изгибом, совмещенным с формоизменением скручиванием.

4. Создана математическая модель локализованного формоизменения ленты (полосы) и разработана программа расчета на ЭВМ.

5. Получены соотношения в аналитическом и численном виде, определяющие деформационные и силовые параметры процесса локализованного формоизменения ленты в области технологической канавки-концентратора.

6. Впервые экспериментально исследована картина распределения интенсивности деформации в зоне технологической канавки. Выявлен характер изменения свойств материала и интенсивности деформации в этой зоне.

7. Получены новые зависимости относительного утонения материала при изгибе моментом от исходной накопленной деформации и относительной кривизны. Найдено, что чем больше исходная накопленная деформация, тем меньше утонение.

8. Установлено, что чем больше накопленная деформации, тем меньше влияет кривизна на изгибающий момент.

9. Процесс профилирования ленты с технологическими канавками позволяет существенно снизить потери на избыточное деформирование и трение, упростить конфигурацию и снизить стоимость инструмента.

10. Создана малогабаритная опытно-производственная профилигибочная машина новой конструкции, предназначенная для

дальнейших исследований, производства тонкостенных профилей и использования в учебном процессе.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах :

1. Типалин С.А. Исследование процесса профилирования ленты на многороликовой гибочной машине. // XXII Гагаринские чтения / Тез. докл. молодежной научной конференции. 8-12 апреля 1996, М.:МГАТУ, 1996, ч.2. с. 17-18.

2. Матвеев А.Д., Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Разработка новой конструкции опытно-производственной профилегибочной машины. // Международная научно-техническая конференция "100 лет Российскому автомобилю. Промышленность и высшая школа." / Тезисы докладов секции "Технология, оборудование и автоматизация заготовительного и механосборочного производства". 26-28 ноября 1996. Россия, Москва. с. 60 - 62.

3. Типалин С.А. Исследование многороликового профилирования ленты. // XXIII Гагаринские чтения / Тез. докл. молодежной научной конференции. Москва, 8-12 апреля 1997, М.:РГТУ-МАТИ, 1997, ч.2., с. 153 - 154.

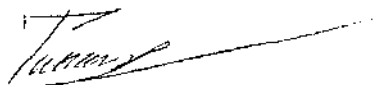
4. Матвеев А.Д., Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Многороликовое профилирование полосы. // Механика и технология в процессах формоизменения с локальным очагом пластической деформации / Тезисы докладов международного научно-технического симпозиума - Орел: ОрелГТУ, 1997., с. 20.

5. Матвеев А.Д., Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Новая конструкция малогабаритной опытно-производственной профилегибочной машины. // Механика и технология в процессах формоизменения с локальным очагом пластической деформации / Тезисы докладов международного научно-технического симпозиума - Орел: ОрелГТУ, 1997., с.21.

6. Типалин С.А., Полковников О.А. Исследование процесса выдавливания технологической канавки при профилировании. // "XXIII Гагаринские чтения" / Тез. докл. Всероссийской молодежной научной конференции. 8 -12 апреля 1998, М.: МГАТУ, ч.2. с. 106.

7. Матвеев А.Д., Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Исследование пластического изгиба предварительно упрочненного листа// Международная конференция "Прогрессивные технологии обработки материалов / Тезисы докладов. 17-18 сентября 1998. Минск. с.57.

8. Матвеев А.Д., Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Пластический изгиб листа из неоднородного металла. // Вопросы исследования прочности деталей машин. / Сборник научных трудов кафедры "Прикладная механика" под редакцией академика Холмина Н.Н. Выпуск 5. Москва, МГАПИ. 1998. с. 32 -38.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Тимошин', written in a cursive style with a long horizontal stroke extending to the right.