

УДК 621.774.372

*к.т.н. Денищенко П. Н.,  
Королёв К. Г.**(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, omdim2009@rambler.ru)*

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КОРоткооправочного ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА

*На основе энергетического метода разработана математическая модель процесса волочения полого профиля на закрепленной цилиндрической и конической оправке (объемная деформация со значительными нормальными напряжениями) с применением закона трения в формулировке Зибеля. Для каждого элементарного объема в канале волоки получена замкнутая система уравнений. Модель позволяет учитывать реальный характер изменения интенсивности напряжений по длине деформационной зоны и особенности трения на контактных поверхностях.*

**Ключевые слова:** волочение труб, труба, оправка, волока, математическая модель, энергетический метод, напряженно-деформированное состояние.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Определение локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при волочении является одним из центральных вопросов, так как оно непосредственно связано с выбором максимально допустимых единичных деформаций и производительностью волочильных станов.

Сложность процесса волочения труб вызывает необходимость аналитического расчета точной величины напряжения и силы волочения для определения расчетным путем энергосиловых параметров процесса, режимов волочения, выбора оборудования и др. Применительно к процессу волочения труб основными факторами, определяющими напряженно-деформированное состояние металла, являются распределение геометрических параметров, механических свойств и условий контактного трения по длине очага деформации [1].

Аналитические методы определения усилия волочения труб основаны на законах механики пластически деформируемого тела и условиях пластичности и определяются совместным решением дифференциального уравнения равновесия сил, действующих на выделенный в очаге элементарный объем металла, и уравнений пластичности для ка-

ждого элемента очага деформации [2]. Такие системы в большинстве случаев являются статически неопределимыми. Для их решения делается ряд допущений, упрощающих задачу и уменьшающих число математических операций [3-5].

К очагу деформации при волочении приложены следующие силы [2, 6-7]: сила волочения, осуществляющая деформацию металла, приложена к металлу со стороны волочильного оборудования; силы трения, возникающие при взаимодействии металла заготовки с волочильным инструментом (волоками и оправками); силы от противонапряжения (когда имеется); силы и напряжения, возникающие в металле при его пластической деформации, при упругих деформациях инструмента и т.п.

Работа, затрачиваемая на процесс волочения, состоит из следующих компонентов: работа на осуществление основной пластической деформации; работа на осуществление дополнительных пластических деформаций, которые протекают немонотонно и меняют свой знак; работа, связанная с упругими деформациями инструмента и металла заготовки; работа, расходуемая на преодоление сил трения; работа на преодоление внешнего противонапряжения

(когда имеется). Эти элементы находятся в тесной взаимосвязи между собой [8].

**Постановка задачи.** Определение на основе энергетического метода локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при волочении труб на закрепленной цилиндрической и конической оправке с учетом особенностей процесса.

**Изложение материала и его результаты.** Используемая в данном случае схема интегрального очага деформации (рис. 1), предполагающая возможность корректного учета реального характера изменения интенсивности напряжений по длине деформационной зоны и особенности трения на контактных поверхностях. Деформация трубы принимается как осесимметричная.

В деформационной зоне выделяется три участка: I – осаживания, II – оправочного волочения и III – калибрующей. Участок I по своему назначению не отличается от первого участка деформационной зоны при волочении трубы без оправки. В зоне I безоправочного волочения в продольном направлении возникают деформации удлинения  $\varepsilon_l$ , в окружном – деформации укорочения  $\varepsilon_\theta$ . Знак и величина величина деформации в радиальном направлении  $\varepsilon_r$  зависят от соотношения напряжений  $\sigma_l$  и  $\sigma_r$ . Из-за отсутствия внутренней опоры направлением наименьшего сопротивления будет радиальное к оси, поэтому металл под действие обоих сжимающих напряжений по закону наименьшего сопротивления потечет в направлении к оси и толщина стенки возрастет. Растягивающие напряжения  $\sigma_l$  вызывают продольную деформацию удлинения  $\varepsilon_l$ , что приводит к утонению стенки трубы в этой зоне. Если это утонение больше, чем утолщение, под действием напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  стенка утоняется и  $\varepsilon_r$  будет деформацией укорочения, при обратном соотношении стенка утолщается и  $\varepsilon_r$  будет деформацией удлинения [8]. Длина стенки трубы в конце зоны безоправочного волочения влияет на напряженно деформированное состояние трубы и протяженности зоны I безоправочного волочения и зоны II оправочного волочения. Поэтому в разрабатываемой модели для определения толщины стенки трубы в конце зоны безоправочного волочения предусмотрена процедура варьирования толщины стенки и определения мощности процесса. Истинному значению варьруемой толщины стенки будет соответствовать минимальное значение мощности. На основании этого, с учетом геометрических соотношений очага деформации определяется  $\alpha_{\theta 0}$  – угол между внутренней поверхностью трубы в зоне I и осью волочения.

Суммарная протяженность I и II зоны составит:

$$L_{I-II} = \frac{R_H - R_K}{\tan \alpha_\theta}, \quad (1)$$

где  $R_H, R_K$  – наружный начальный и конечный радиус трубы, соответственно;  
 $\alpha_\theta$  – рабочий угол волоки.

Протяженность II зоны оправочного волочения находится из соотношения:

$$L_{II} = \frac{R_H - R_K - t_H + t_K - L_{I-II} \cdot \tan \alpha_{\theta 0}}{\tan \alpha_{op} - \tan \alpha_{\theta 0}}, \quad (2)$$

где  $t_K$  – конечная толщина стенки;  
 $t_H$  – начальная толщина стенки трубы.

Протяженность I зоны осаживания:

$$L_I = L_{I-II} - L_{II}. \quad (3)$$

Протяженность III калибрующей зоны ( $l_k$ ) соответствует конструктивной протяженности калибрующего пояса волоки. Полная протяженность очага деформации  $L_{I-III}$  находится суммированием всех зон.

Параметры напряженно-деформированного состояния в зонах I-III устанавливали в конечном числе точек. Для этого деформационная зона разбивается на N узких кольцевых элементов одинаковой длины  $\Delta x$ . Число элементов необходимо выбирать таким образом, чтобы в пределах каждого элемента процесс деформирования считался монотонным.

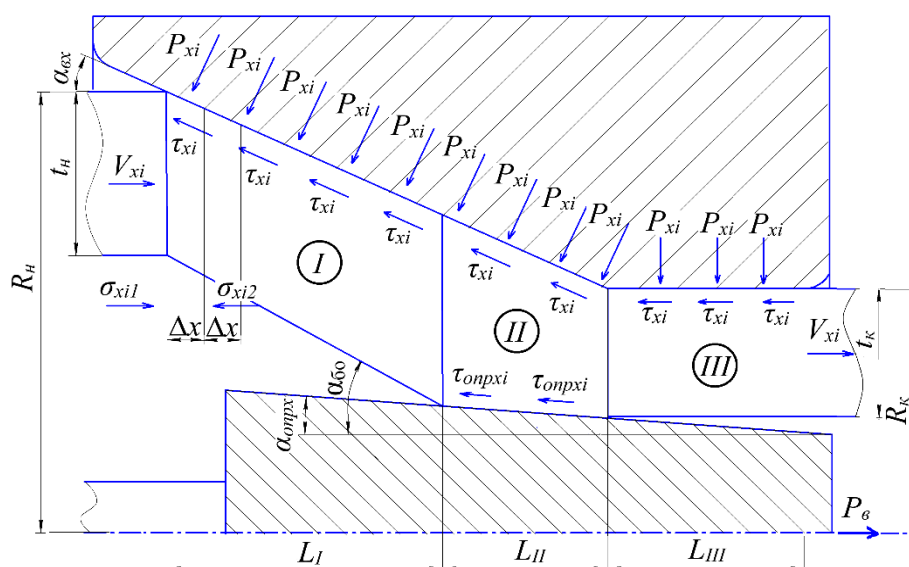


Рисунок 1 – Расчетная схема интегрального очага деформации

В отличие от работы [3], где в качестве параметра деформированного состояния принята только интегральная деформация удлинения (чего недостаточно для адекватного представления о деформированном состоянии волочения труб на закрепленной оправке в связи с монотонностью деформации), в математической модели учитываем все главные логарифмические деформации. Для описания бесконечно малых приращений деформаций для  $i$ -го элемента используем логарифмические показатели деформации:

$$(\Delta \varepsilon_{\theta})_{xi} = \ln \frac{R_{xi}}{R_{xi-1}}; \quad (4)$$

$$(\Delta \varepsilon_r)_{xi} = \ln \frac{t_{xi}}{t_{xi-1}}; \quad (5)$$

$$(\Delta \varepsilon_l)_{xi} = \ln \frac{l_{xi}}{l_{xi-1}} = \ln \frac{F_{xi-1}}{F_{xi}}, \quad (6)$$

где  $R_{xi}$ ,  $R_{xi-1}$ ,  $t_{xi}$ ,  $t_{xi-1}$ ,  $l_{xi}$ ,  $l_{xi-1}$ ,  $F_{xi-1}$ ,  $F_{xi}$  – средний радиус, толщина стенки, длина элемента, площадь поперечного сечения элемента в текущем и предыдущем сечении соответственно.

Эти показатели связывает условие постоянства объема:

$$(\Delta \varepsilon_{\theta})_{xi} + (\Delta \varepsilon_r)_{xi} + (\Delta \varepsilon_l)_{xi} = 0. \quad (7)$$

Интенсивность бесконечно малых приращений деформаций, в соответствии с рекомендациями работы [4], определяется по формуле:

$$(\Delta \varepsilon)_{xi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \sqrt{[(\Delta \varepsilon_{\theta})_i^2 + (\Delta \varepsilon_r)_i^2 + (\Delta \varepsilon_{\theta})_i (\Delta \varepsilon_r)_i]}. \quad (8)$$

Для каждого  $i$ -го элемента, следуя рекуррентной схеме решения, конечные деформации определяются по формулам:

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{\theta})_{xi} &= (\varepsilon_{\theta})_{xi-1} + (\Delta \varepsilon_{\theta})_{xi}; \\ (\varepsilon_r)_{xi} &= (\varepsilon_r)_{xi-1} + (\Delta \varepsilon_r)_{xi}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (\varepsilon_l)_{xi} &= (\varepsilon_l)_{xi-1} + (\Delta \varepsilon_l)_{xi}; \\ (\varepsilon_i)_{xi} &= (\varepsilon_i)_{xi-1} + (\Delta \varepsilon_i)_{xi}. \end{aligned}$$

Материал трубы принимается изотропно-упрочняющимся, интенсивность напряжений для  $i$ -го элемента определяется из закона упрочнения, заданного в виде степенного ряда:

$$(\sigma_{mx})_i = \sigma_{TO} + A(\varepsilon_i)_{xi}^n, \quad (10)$$

где  $\sigma_{TO}$ ,  $A$ ,  $n$  – экспериментальные константы материалов.

В большинстве научно-технической литературы [3, 4, 8], посвященной вопросам

волочения, для определения сил трения используется закон Амонтона-Кулона. Однако, в работе [6] отмечено, что попытка опереться на основы теории сухого трения при точном анализе процессов ОМД в ряде случаев приводило к неудовлетворительным результатам (особенно при анализе объемных процессов). При значительных величинах нормальных напряжений происходит пластическая деформация контактных поверхностей, что приводит к потере линейной зависимости силы трения от нормальной силы. Использование закона Амонтона-Кулона более целесообразно в анализе процессов, в которых нормальное напряжение  $\sigma_n < \sigma_m$ . Таким образом, применительно к процессам волочения полого профиля на оправке (объемная деформация со значительными нормальными напряжениями) пользоваться законом Амонтона-Кулона нецелесообразно, в связи с неизбежностью принятия весьма грубых допущений. Поэтому, более корректно использовать закон трения Э. Зибеля:

$$\tau_x = \mu \cdot \beta \cdot \sigma_m, \quad (11)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения по напряжению текучести;

$\beta$  – коэффициент Луде;

$\sigma_m$  – предел текучести.

Условие баланса энергетических затрат в общем виде в каждом элементарном объеме очага деформации составляем по аналогии с работами [3, 9]:

$$N_{x\sigma i2} = N_{x\sigma i1} + N_{x\tau ci} + N_{x\tau onpi} + N_{x\phi i}, \quad (12)$$

где  $N_{x\sigma i2}$ ,  $N_{x\sigma i1}$  – текущее по длине очага деформации значения мощностей нормальных осевых напряжений  $\sigma_{xi1}$  и  $\sigma_{xi2}$ , которые действуют соответственно, в начальном и конечном граничных сечениях выделенного  $i$ -го элементарного объема;

$N_{x\tau ci}$ ,  $N_{x\tau onpi}$  – текущее значение мощности, расходуемое на трение на контакт-

ной поверхности волокна и оправки, соответственно.

$N_{x\phi i}$  – текущее значение мощности, расходуемое непосредственно на пластическое формоизменение металла в рамках выделенного  $i$ -го элементарного объема.

$$\begin{aligned} N_{x\sigma i1} &= \sigma_{xi1} \cdot F_{xi1} \cdot V_{xi1}; \\ N_{x\sigma i2} &= \sigma_{xi2} \cdot F_{xi2} \cdot V_{xi2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $V_{xi1}$ ,  $V_{xi2}$  – скорости перемещения металла в начальном и конечном граничных сечениях.

$$\begin{aligned} N_{x\tau ci} &= \tau_{xi} \cdot \frac{V_{xi1} + V_{xi2}}{2 \cdot \cos a_{exi}} \times \\ &\times \frac{\pi(R_{ni1} + R_{ni2})}{2} \cdot \frac{\Delta x}{\cos a_{exi}}; \\ N_{x\tau onpi} &= \tau_{onpxi} \cdot \frac{V_{xi1} + V_{xi2}}{2 \cdot \cos a_{onpxi}} \times \\ &\times \frac{\pi(R_{gni1} + R_{gni2})}{2} \cdot \frac{\Delta x}{\cos a_{onpxi}}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\tau_{xi1}$ ,  $\tau_{xi2}$ ,  $\tau_{onpxi1}$ ,  $\tau_{onpxi2}$  – касательные напряжения между волоком и оправкой, действующие в начальном и конечном граничных сечениях выделенного  $i$ -го элементарного объема;

$R_{ni1}$ ,  $R_{ni2}$ ,  $R_{gni1}$ ,  $R_{gni2}$  – наружный и внутренний радиус трубы, в начальном и конечном граничных сечениях выделенного  $i$ -го элементарного объема;

$a_{exi}$ ,  $a_{onpxi}$  – соответственно рабочий угол волокна и оправки.

$$N_{x\phi i} = \beta \cdot (\sigma_{mx})_i \cdot (\Delta \varepsilon_i)_{xi} \cdot F_{xi2} \cdot V_{xi2}. \quad (15)$$

Используя инженерное условие пластичности в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{xi1} &= P_{xi1} - 2K_{xi1}; \\ \sigma_{xi2} &= P_{xi2} - 2K_{xi2}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $P_{xi1}$ ,  $P_{xi2}$  – значение нормальных контактных напряжений, которые дейст-

вуют, соответственно, в начальном и конечном граничных сечениях выделенного  $i$ -го элемента;

$K_{xi1}, K_{xi2}$  – значение сопротивления сдвигу металла, соответственно, в началь-

ном и конечном граничных сечениях выделенного  $i$ -го элемента.

А так же закон трения (11), уравнение (12) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{xi1} V_s = & (P_{xi2} - 2K_{xi2}) V_s + \mu_{xi} \beta(\sigma_{mx})_{i1} \frac{V_s \cdot \pi(R_{ni1} + R_{ni2})}{4 \cdot F_{xi1} \cdot \cos a_{exi}} \cdot \frac{\Delta x}{\cos a_{exi}} + \\ & + \mu_{xi} \beta(\sigma_{mx})_{i2} \frac{V_s \cdot \pi(R_{ni1} + R_{ni2})}{4 \cdot F_{xi2} \cdot \cos a_{exi}} \cdot \frac{\Delta x}{\cos a_{exi}} + \mu_{onpxi} \beta(\sigma_{mx})_{i1} \frac{V_s \cdot \pi(R_{gni1} + R_{gni2})}{4 \cdot F_{xi1} \cdot \cos a_{onpxi}} \times \\ & \times \frac{\Delta x}{\cos a_{onpxi}} + \mu_{onpxi} \beta(\sigma_{mx})_{i2} \frac{V_s \cdot \pi(R_{gni1} + R_{gni2})}{4 \cdot F_{xi2} \cdot \cos a_{onpxi}} \cdot \frac{\Delta x}{\cos a_{onpxi}} + \beta \cdot (\sigma_{mx})_i \cdot (\Delta \varepsilon_i)_{xi} \cdot V_s \end{aligned} \quad (17)$$

где  $V_s$  – секундный объем металла, проходящего через  $i$ -ое сечение,  $V_s = const$  в каждом сечении.

$\mu_{xi}, \mu_{onpxi}$  – коэффициент трения по направлению течения на волоке и оправке.

Следуя используемой рекуррентной схеме решения, уравнение (17) представляет собой уравнение с одной неизвестной  $P_{xi2}$ . После преобразований, получим уравнение, справедливое для II зоны оправочного волочения:

$$\begin{aligned} P_{xi2} = & 2K_{xi2} + \sigma_{xi1} - \frac{\mu_{xi} \beta(\sigma_{mx})_{i1} \Delta x (R_{ni1} + R_{ni2}) \pi}{4 F_{xi1} \cos^2 a_{exi}} - \frac{\mu_{xi} \beta(\sigma_{mx})_{i2} \Delta x (R_{ni1} + R_{ni2}) \pi}{4 F_{xi2} \cos^2 a_{exi}} - \\ & - \frac{\mu_{onpxi} \beta(\sigma_{mx})_{i1} \Delta x (R_{gni1} + R_{gni2}) \pi}{4 F_{xi1} \cos^2 a_{onpxi}} - \frac{\mu_{onpxi} \beta(\sigma_{mx})_{i2} \Delta x (R_{gni1} + R_{gni2}) \pi}{4 F_{xi2} \cos^2 a_{onpxi}} - \beta(\sigma_{mx})_i (\Delta \varepsilon_i)_{xi} \end{aligned} \quad (18)$$

В I зоне осаживания нет контакта между внутренней поверхностью трубы и оправкой и уравнение (18) для этой зоны примет вид:

$$\begin{aligned} P_{xi2} = & 2K_{xi2} + \sigma_{xi1} - \\ & - \frac{\mu_{xi} \beta(\sigma_{mx})_{i1} \Delta x \cdot \pi(R_{ni1} + R_{ni2})}{4 F_{xi1} \cos^2 a_{exi}} - \\ & - \frac{\mu_{xi} \beta(\sigma_{mx})_{i2} \Delta x \cdot \pi(R_{ni1} + R_{ni2})}{4 F_{xi2} \cos^2 a_{exi}} - \\ & - \beta \cdot (\sigma_{mx})_i \cdot (\Delta \varepsilon_i)_{xi} \end{aligned} \quad (19)$$

В III калибрующей зоне пластической деформации трубы практически не проис-

ходит [8], следовательно, мощность  $N_{xfi}$ , расходуемая непосредственно на пластическое формоизменение металла в рамках выделенного  $i$ -го элементарного объема принимаем равной нулю. Кроме того, в этой зоне в связи с практически отсутствием пластического формоизменения, используем закон контактного трения Амонтона-Кулона. Тогда уравнение (18) для III калибрующей зоны, в случае волочения на цилиндрической оправке, примет вид:

$$P_{xi2} = \frac{2K_{xi2} + \sigma_{xi1} - P_{xi1} \cdot f_{xi} \frac{\pi(R_{ni1} + R_{ni2}) \Delta x}{4 F_{xi1} \cos^2 a_{exi}} - P_{xi1} \cdot f_{onpxi} \frac{\pi(R_{gni1} + R_{gni2}) \Delta x}{4 F_{xi1} \cos^2 a_{onpxi}}}{1 + f_{xi} \frac{\pi(R_{ni1} + R_{ni2}) \Delta x}{4 F_{xi2} \cos^2 a_{exi}} + f_{onpxi} \frac{\pi(R_{gni1} + R_{gni2}) \Delta x}{4 F_{xi2} \cos^2 a_{onpxi}}}, \quad (20)$$

где  $f_{xi}, f_{onpxi}$  – значение коэффициента трения на волоке и оправке.

В случае волочения на конической оправке:

$$P_{xi2} = \frac{2K_{xi2} + \sigma_{xi1} - P_{xi1} \cdot f_{xi} \frac{\pi(R_{ni1} + R_{ni2})\Delta x}{4F_{xi1} \cos^2 a_{\text{вxi}}}}{1 + f_{xi} \frac{\pi(R_{ni1} + R_{ni2})\Delta x}{4F_{xi2} \cos^2 a_{\text{вxi}}}} \quad (21)$$

Таким образом, для каждого элементарного объема в канале волокна получаем замкнутую систему уравнений.

Процесс вычисления параметров напряженно-деформированного состояния начинается вначале I зоны осаживания со значения  $i=1$ . При этом, для элементарного объема, расположенного до входа в очаг деформации, считаются известными все параметры напряженно-деформированного состояния:  $(\varepsilon_{\theta})_{xi}=0$ ;  $(\varepsilon_r)_{xi}=0$ ;  $(\varepsilon_l)_{xi}=0$ ;  $\sigma_{xi}=0$ ;  $P_{xi}=0$ .

В качестве примера, приведен результат расчета на ЭВМ напряженно-деформированного состояния при волочении труб со следующими исходными данными: материал трубы – медь,  $\sigma_T=94,65+368,2(\varepsilon)^{0,763}$ ,  $D_H=30$  мм,  $t_H=2$  мм,  $D_K=25,2$  мм,  $t_K=1,6$  мм,  $l_K=5$  мм,  $\beta=1$ ,  $\mu_{xi}=\mu_{\text{опрxi}}=f_{xi}=f_{\text{опрxi}}=0,1$ ,  $\alpha_B=12$ . Распределение локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния при  $\alpha_{\text{опр}}=2^\circ$  (коническая оправка) приведены на рисунке 2, при  $\alpha_{\text{опр}}=0^\circ$  (цилиндрическая оправка) приведены на рисунке 3.

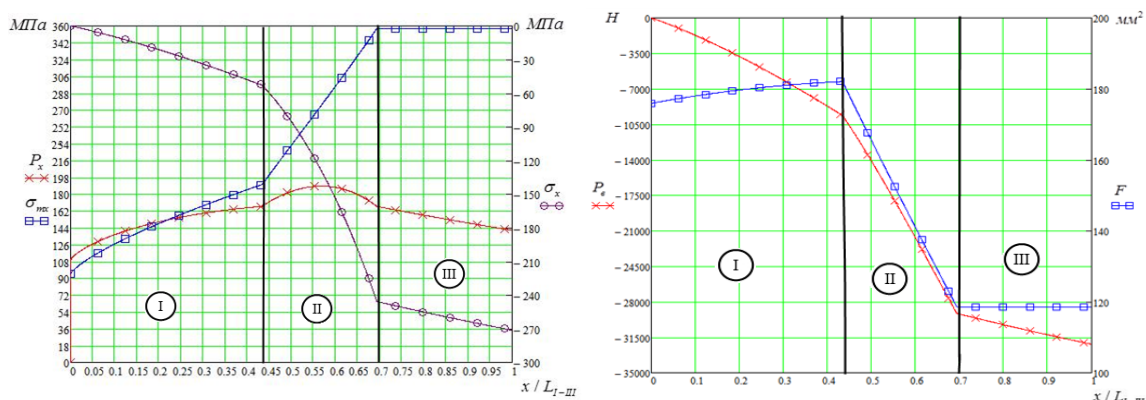


Рисунок 2 – Распределение локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния по длине канала волокна ( $\alpha_{\text{опр}}=2^\circ$ )

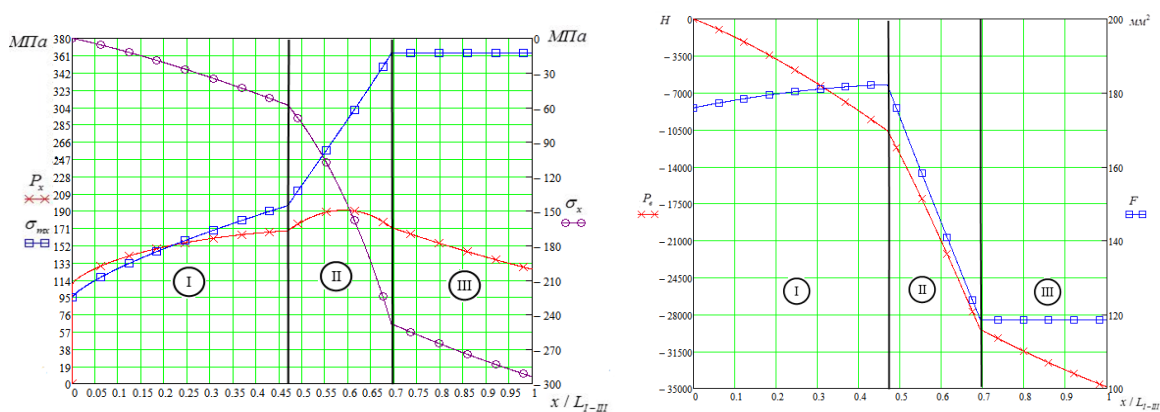


Рисунок 3 – Распределение локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния по длине канала волокна ( $\alpha_{\text{опр}}=0^\circ$ )

Предел текучести  $\sigma_T$  возрастает на протяжении I зоны и более интенсивно во II зоне, в связи с возрастанием интенсивности деформации. В III зоне в связи с отсутствием деформации предел текучести  $\sigma_T$  не изменяется. По всей длине канала волокна действуют монотонно увеличивающиеся от входа к выходу осевые сжимающие нормальные напряжения  $\sigma_{xi}$ , причем наиболее интенсивно во II зоне оправочного волочения. Нормальные контактные напряжения  $P_{xi}$  не линейно растут на протяжении I зоны, и достигают максимума в районе середины II зоны и уменьшаются к выходу из канала волокна. Наличие экстремума во II зоне можно объяснить изменением отношения толщины стенки к площади поперечного сечения. Отличительной особенностью волочения на конической и цилиндрической оправке является изменение соотношений протяженности I зоны осаживания и II зоны оправочного волочения (при волочении на конической оправке эта зона больше), как следствие, снижение демонотонности деформации. Отсутствие контакта между металлом и конической оправкой в зоне III уменьшает усилие волочения.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Разработанная математическая модель учитывает реальный характер изменения интенсивности напряжений по длине деформационной зоны и особенности трения на контактных поверхностях. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что особенности оправочного волочения труб, при котором существует демонотонность деформации стенки трубы, делает предпочтительным использование не силовых, а энергетических подходов. Распределение локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния по длине канала волокна носят довольно сложный характер, на который влияет множество факторов. Необходима дальнейшая разработка и совершенствование полученной математической модели с целью максимального приближения к натуре: учета внеконтактной пластической и упругой деформации, продольного колебания деформируемой трубы и стержня оправки, а также их влияния на точность размеров и качество получаемых труб.

### Библиографический список

1. Стасовский Ю. Н. Современное состояние оборудования и технологии производства холоднодеформированных труб с применением процессов волочения в Украине / Ю. Н. Стасовский // Теория и практика в металлургии, 2012. — С 31-34.
2. Технология и оборудование трубного производства / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов. — М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. — 608 с.
3. Касьянюк С. В. Расчет процесса волочения труб на неподвижной оправке на основе энергетического подхода / С. В. Касьянюк, С. Ю. Саплин, С. В. Чемерис // Обработка материалов давлением : Сб. науч. трудов №1(19). — Краматорск, 2008. — С. 130-134.
4. Каргин Б. В. Напряженно деформированное состояние при безопрочно волочении тонкостенных труб с подпором / Б. В. Каргин, В. Р. Каргин, Т. С. Пастушенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. — Т. 14, № 6. — С. 77-80.
5. Осадчий В. Я. Методика расчета напряжения волочения труб на короткой оправке / В. Я. Осадчий, Н. А. Малевич // Сборник трудов научно-технической конференции «Информатика и технология». — М.: МГАПИ, 2005. — С. 38-49.
6. Малевич Н. А. Исследование моделей напряженно-деформированного состояния металла при волочении труб и разработка методики определения силовых параметров волочения на самоустанавливающейся оправке : дис. канд. техн. наук.: 05.03.05 Москва, 2007. — 201 с.
7. Данченко В. Н. Теория процессов обработки металлов давлением: учебник / В. Н. Данченко, В. А. Гринкевич, А. Н. Головки. — Днепропетровск: Пороги, 2010. — 386 с.

8. Перлин И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, М. З. Ерманок. — М.: Металлургия, 1971. — 448 с.

9. Сатонін О. В. Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологічних режимів і конструктивних параметрів механічного устаткування листопрокатного виробництва : автореф. дис. д-ра. техн. наук: спец. 05.03.05 / О. В. Сатонін. — ДДМА : Краматорськ, 2001. — 35 с.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Новохатским А.М., д.т.н., проф. ДГМА Алиевым И.С.*

**к.т.н. Денищенко П.М., Корольов К.Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

#### **РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КОРОТКООПРАВНОГО ВОЛОЧІННЯ ТРУБ НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ**

*На основі енергетичного методу розроблена математична модель процесу волочіння полого профілю на закріпленій циліндричній та конічній оправці (об'ємна деформація зі значними нормальними напруженнями) із застосуванням закону тертя у формулюванні Зібеля. Для кожного елементарного об'єму в каналі волоки отримана замкнута система рівнянь. Модель дозволяє враховувати реальний характер змін інтенсивності напружень по довжині деформаційної зони та особливості тертя на контактних поверхнях.*

**Ключові слова:** волочіння труб, труба, оправка, волока, математична модель, енергетичний метод, напружено-деформований стан.

**PhD Denishchenko P. N., Korolyov K. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

#### **DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL PROCESS MODEL OF THE SHORT MANDREL TUBE DRAWING BASED ON THE ENERGY METHOD**

*A mathematical model of the drawing process of hollow profile in the fixed cylindrical and conical mandrel (volumetric strain with significant normal stresses) using the friction law at Siebel's interpretation was developed on the base of energy method. A closed equation system for each elementary volume was obtained in the die hole. The model allows taking into account the real behavior of the stress intensity along the length of the deformation zone and friction characteristic features on contact surfaces.*

**Key words:** drawing the tubes, tube, mandrel, die, mathematical model, the energy method, the stress-strain state.