

УДК 621.774

Нахайчук О. В

(Вінницький державний аграрний університет)

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССАХ ГИБКИ ПРУТКОВ И ТРУБЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В статье представлены методики расчёта напряжённо-деформированного состояния для технологических процессов навивки пружин зубьев граблей ГВР – 6 и формирования крутоизогнутых отводов. Используя современный аппарат феноменологической теории деформируемости металлов без разрушения, а также экспериментально-расчётные методы исследования механики деформирования изделий, даны оценки запасов пластичности в опасных областях деформирования, а также рекомендации по совершенствованию исследуемых процессов.

In clause the techniques of account of the stress-deformed state for technological processes winding of springs toots of a raker ГВР - 6 and formation sharply curved offsets are submitted. Using the modern device phenomenological of the theory deformability of metals without destruction, and also experimental - calculation methods of research of the mechanics deformability of products, are given estimations of stocks of plasticity in dangerous areas deformation, and also recommendation for perfection of researched processes.

Введение

Для совершенствования существующих технологических процессов ОМД и создания новых необходимо применять комплексные подходы к изучению механики формообразования изделий. Исследования процессов гибки прутков и трубчатых поверхностей [1,2,3] описывают далеко не все явления, происходящие при их формировании, что приводит к необходимости решения следующих задач:

Постановка задач

- разработки физико-математических моделей, позволяющих рассчитать напряжённо-деформированное состояние в опасных областях деформирования;
- определение в этих областях использованного ресурса пластичности для прогнозирования

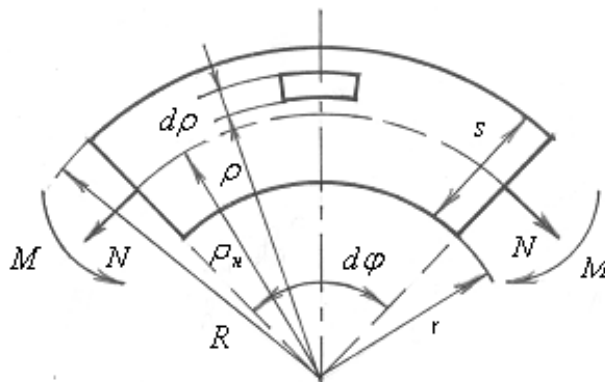


Рис. 1. К определению напряжённо-деформированного состояния при гибке прутка

- прогнозирования вероятности появления макротрещин и микроразрушений в зависимости от технологических параметров процесса;
- изучение технологического наследия изделий с проведением оценки их качества с применением критериев разрушения, учитывающих направленность характера повреждений.

Основная часть

Для анализа поля напряжённого состояния при гибке прутка введём полярную систему координат и примем, что в случае изгиба моментом и нормальной силой напряжения σ_ρ и σ_φ являются главными (рис. 1). В этом случае уравнение равновесия имеет вид:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\varphi = 0 \quad (1)$$

Условие пластичности с использованием гипотезы максимальных касательных напряжений:

$$\sigma_\rho - \sigma_\varphi = \pm \sigma_u, \quad (2)$$

где σ_u - интенсивность напряжений, причём знак плюс относится к зоне растяжения, а минус - к зоне сжатия волокон заготовки в тангенциальном направлении.

Для расчёта поля напряжений с учетом упрочнения необходимо, чтобы была построена кривая течения и было известно распределение деформаций по толщине заготовки. Учитывая, что зона немонотонной деформации при $r > s$ сравнительно невелика [2], можно для получения замкнутых решений принять, что деформации в любой точке изгибаемой заготовки определяются из условия, при котором поворот сечений в процессе изгиба осуществляется относительно слоя, с которым совмещается нейтральная поверхность в конечный момент деформирования. При таких допущениях величина логарифмических деформаций e_φ в тангенциальном направлении может быть определена из соотношения :

$$e_\varphi = \ln \frac{\rho}{\rho_n}, \quad (3)$$

где ρ_n - радиус нейтрального слоя, ρ - текущее значение радиуса кривизны изгиба. Учитывая, что материал, который находится в пластическом состоянии несжимаем, и $\sigma_z = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2}$, интенсивность деформаций e_u определится через тангенциальную деформацию соотношением:

$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}} e_\varphi = 1,15 e_\varphi \quad (4)$$

Аппроксимацию кривой упрочнения примем в виде степенной зависимости:

$$\sigma_u = A e_u^n = A \left(\ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n, \quad (5)$$

где A и n - коэффициенты аппроксимации, определяемые по кривой течения исследуемого материала. Совместное решение уравнения равновесия (1), условия пластичности (2), в котором интенсивность напряжений σ_u определяется формулой (5), приводит к дифференциальному уравнению вида:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = \pm A \left(\pm \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n, \quad (6)$$

где, как и прежде, знак плюс относится к зоне тангенциального растяжения, а знак минус - к зоне сжатия.

Интегрирование уравнения (6) с использованием граничного условия в зоне растяжения, по которому $\sigma_\rho = 0$ при $\rho = R$, даёт формулы:

$$\sigma_\rho = -\frac{A}{n+1} \left[\left(\ln \frac{R}{\rho_n} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{n+1} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\rho + A \left(\ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n. \quad (8)$$

При наличии растягивающих продольных сил, действующих на изгибающуюся заготовку, необходимо, чтобы на внутренней поверхности заготовки были приложены

сжимающие напряжения σ_k - контактные напряжения по пуансону. Следовательно, в зоне сжатия интегрирование дифференциального уравнения (6) приводит к выражениям:

$$\sigma_\rho = -\frac{A}{n+1} \left[\left(\ln \frac{R}{\rho_n} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{n+1} - \frac{(n+1)\sigma_k}{A} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_\varphi = \sigma_\rho - A \left(\ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n, \quad (10)$$

где ρ_n - радиус нейтральной поверхности. На нейтральной поверхности при $\rho = \rho_n$ напряжения σ_ρ , определяемые по формулам (7) и (9) для зон сжатия и растяжения соответственно равны между собой. Приравняв их, получим:

$$-\left(\ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{n+1} + \ln \left(\frac{\rho_n}{\rho} \right)^{n+1} = \frac{(n+1)\sigma_k}{A} \quad (11)$$

Если отношение радиусов, находящихся под знаком логарифма, незначительно отличаются от единицы, можно заменить логарифмы первыми членами разложения логарифма в ряд, тогда формула (11) может быть заменена приближённой:

$$\rho_n = \frac{r\sigma_k}{2A} + \sqrt{\frac{r^2\sigma_k^2}{4A^2} + rR} \quad (12)$$

Из этого выражения легко получить формулу для определения радиуса нейтральной поверхности, найденную И. П. Ренне при условии, что ($\sigma_k = 0$):

$$\rho_n = \sqrt{rR} \quad (13)$$

Связь между растягивающими напряжениями, вызванными действием продольной силы N и контактными напряжениями σ_k находим из условия равновесия сил:

$$2N \sin \frac{d\varphi}{2} = \sigma_k b r d\varphi, \quad (14)$$

где b - ширина контакта изогнутого пружка на оправке. Принимая $\sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2}$ и $N = P$, где P - растягивающая сила, из (15) находим:

$$\sigma_k = \frac{P}{br} \quad (15)$$

Ширина контакта изогнутого прутка на оправке определим из условия пятна контакта двух взаимодействующих цилиндров [3], тогда:

$$\sigma_k = 0,465 \sqrt{\frac{PE}{rs}}, \quad (16)$$

где s - диаметр прутка, E модуль упругости материала.

Данная методика расчёта напряжённо-деформированного состояния была апробирована на процессе изготовления прутков граблей ГВР - 6, пружины жесткости и зубья которых изготавливают из прутка диаметром $s = 8$ мм (сталь 65Г). Другие, необходимые для расчёта накопленной степени деформации, исходные данные такие: $r = 22,5$ мм, $R = 30,5$ мм, $P = 140$ Н, $E = 2 \times 10^{11}$ Па.

Оценку деформируемости металла при изготовлении зубьев граблей проводили с помощью критерия деформируемости, который позволяет оценить допустимые деформации на стадии изготовления изделия на основании информации о напряженно-деформированном состоянии в процессе гибки прутка и диаграммы пластичности исследуемого материала.

Диаграмма пластичности материала (рис. 2) строилась в координатах: показатель напряжённого состояния η - предельная до разрушения накопленная степень пластических деформаций e_u . Показатель напряжённого состояния η определялся соотношением:

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}} \quad (17)$$

где σ - среднее напряжение, σ_u - интенсивность напряжений.

Предельная до разрушения деформация e_u является мерой пластичности и может быть определена, например, параметром Одквиста [3]:

$$e_u = \int_0^{t_p} \dot{\varepsilon}_i d\tau, \quad (18)$$

где $\dot{\varepsilon}_i$ - интенсивность скорости деформации, t_p - параметр, характеризующий течение деформирования вплоть до разрушения.

Диаграммы пластичности строили по результатам экспериментальных исследований образцов материала до разрушения на сжатие ($\eta = -1$), кручение ($\eta = 0$) и растяжение ($\eta = 1$) с последующей аппроксимацией [4]. Кроме диаграммы пластичности необходимо располагать путём деформирования опасных частиц материала, под которым понимают зависимость накопленной степени деформации e_u от показателя напряжённого состояния η в опасной области пластического деформирования изделия.

Наиболее опасными являются внешние области изгиба, т.е. точки материала при $\rho = R$. Показатель напряжённого состояния η , определяемый по формуле (17), можно переписать в виде:

$$\eta = \frac{\sigma_\varphi + \sigma_\rho + \sigma_z}{\sigma_u} \quad (19)$$

Подставив значения напряжений σ_φ , σ_ρ , σ_r и σ_u из формул (5) – (8) для $\rho = R$ находим, что в наиболее опасной области величина $\eta=1,5$ и не зависит от стадии деформирования.

Пользуясь формулами (4) и (5), определяем значение накопленной степени деформации в опасной области деформирования:

$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}} e_\varphi = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{\rho_n}, \quad (20)$$

где ρ_n - определяется по формуле (12) с использованием формулы (16).

Мерой накопления микрповреждений принято считать использованный ресурс пластичности ψ [3,4,5]. В материалах на стадии поставки (например, стальной прокат и др.) полагают, что микрповреждения отсутствуют, следовательно, $\psi = 0$. Изделия в процессе обработки давлением, а затем в процессе эксплуатации накапливают повреждения. Ко времени исчерпания работоспособности полагают, что накапливается критическое количество микрповреждений. В таком случае использованный ресурс пластичности ψ равен (или близок) единице. Критерий деформируемости для процессов, у которых накопление повреждений происходит при $\eta = const$ (как в нашем случае) может быть записан в виде [3]:

$$\psi = \frac{e_u}{e_{np}} \leq 1, \quad (21)$$

где e_{np} - пластичность или предельная степень деформации при значении η , взятой из диаграммы пластичности. Результаты расчета накопленной степени деформации e_u , значение e_{np} (при $\eta = 1,5$), полученное из диаграммы пластичности стали 65Г, а также рассчитанная величина использованного ресурса пластичности ψ составляют: $e_u = 0,122$, $e_{np(\eta=1,5)} = 0,171$, $\psi = 0,85$.

Примером исследования механики гибки трубчатых поверхностей могут быть проведённые нами исследования совместно с ИСМ НАН Украины по оценке деформируемости крутоизогнутых отводов при их формировании методом одновременной протяжки с изгибом заневоленной трубы [6]. Крутоизогнутые отводы используются для производства, монтажа и ремонта систем трубопроводов а также для базовых конструкций в атомной промышленности. Основным элементом технологического оборудования разработанного процесса является устройство для формирования крутоизогнутых отводов, состоящее из корпуса, в котором закреплены вращающийся ролик и деформирующий элемент (дорн). На одной оси с роликом установлен рычаг. В центральное отверстие корпуса вставлена гильза с закреплённым на ней деформирующим элементом. Дорн служит направляющей для толкателя. В начальный момент работы рычаг находится в горизонтальном положении. Трубная заготовка устанавливается на гладкой части деформирующего элемента. Плита пресса давит на торец толкателя, при этом заготовка проходит по рабочей части деформирующего элемента, в результате чего происходит раздача и калибровка внутреннего диаметра заготовки. При дальнейшем перемещении заготовка входит в захватный участок рычага и совместно с рычагом перемещается по рабочей поверхности ролика. При этом радиусная часть деформирующего элемента препятствует получению овальности изделия выше пределов допуска. Радиусная часть ролика предохраняет отвод от появления гофр в месте изгиба. После окончания формирования отвода готовое изделие подаётся через окно в корпусе.

Распределение напряжений в опасной зоне определяли экспериментально – аналитическим путём с привлечением моментной теории оболочек для упрочняющегося материала [7]:

$$\sigma_\alpha = \sigma_u \left[-\frac{R_2}{s} \cdot (1 - \cos \alpha)^2 + \sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} \cdot (1 - \cos \alpha)^4 + 1} \right], \sigma_\theta = \sigma_u, \sigma_u = A e_u^n \quad (22)$$

$$e_u = e_u^* \left(\frac{\alpha}{\alpha 1} \right)^q, \quad (23)$$

где σ_α и σ_θ - главные напряжения соответственно в меридиональном и окружном сечениях; σ_u - интенсивность напряжений; α - угол поворота сечения отвода; s - толщина стенки трубы; R_2 - кривизна изгиба внешней части заготовки в меридиональном направлении, $R_2 = R + \frac{d-s}{2}$, R - радиус изгиба центральной оси заготовки, d - наружный диаметр заготовки, e_u - интенсивность деформаций; e_u^* - накопленная интенсивность деформаций в конечной точке на дуге, соответствующей углу $\alpha 1$; q - параметр, характеризующий интенсивность накопления пластических деформаций.

Компоненты тензора напряжений в опасных зонах определялись также по деформационной теории пластичности [8]. При этом методом визиопластичности изучалось искривление ячеек делительной сетки. Предполагалось, что деформирование металла в окрестностях исследуемой ячейки достаточно близко к простому, а направление Z,

нормальное к плоскости ячейки, делительной сетки, является главным направлением тензоров деформаций. Тогда при плоском напряжённом состоянии:

$$\sigma_x = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} e_x + \sigma; \quad \sigma_y = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} e_y + \sigma; \quad \tau_{xy} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} e_{xy}, \quad (24)$$

где σ - гидростатическое давление; σ_u - интенсивность напряжений; e_u - интенсивность логарифмических деформаций; e_x , e_y , e_z - компоненты тензора логарифмических деформаций:

$$e_x = e_1 \cos^2 \varphi_1 + e_2 \sin^2 \varphi_1; \quad e_y = e_1 \sin^2 \varphi_1 + e_2 \cos^2 \varphi_1; \quad e_z = (e_1 + e_2) \sin^2 \varphi_1, \quad (25)$$

где φ_1 - угол между первым главным направлением тензора деформаций Лагранжа \mathcal{E}_{ij} и осью X;

$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_1 e_2} \quad (26)$$

Интенсивность напряжений σ_u , подобно предыдущему примеру, определяли по интенсивности деформации из кривой течения, построенной испытанием материала на растяжение. Учитывая, что при двухосном напряжённом состоянии $\sigma_z = 0$, то с учётом условия несжимаемости, получим:

$$\sigma_x = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} (2e_x + e_y); \quad \sigma_y = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} (2e_y + e_x); \quad \tau_{xy} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} e_{xy} \quad (27)$$

Главные компоненты деформаций находили, используя поэтапный метод исследования деформированного пространства. Накопленное значение интенсивности деформаций за n этапов деформирования определяли суммированием этапных значений:

$$e_u = \sum_{i=1}^n (\Delta e_u)_i \quad (28)$$

Размеры ячеек были такими, что в пределах каждой удовлетворялось условие монотонности. На исходную заготовку трубы наносили сетку с параметрами $2a_0 = 4,5$ мм, $2b_0 = 4,7$ мм ($D = 57$ мм) и $2a_0 = 3,5$ мм, $2b_0 = 3,5$ мм ($D = 89$ мм). Анализ искажённых ячеек показал, что при таких размерах стороны ячейки слабо искривляются, т. е. условие монотонности удовлетворяется. Параметры сетки измерялись на инструментальном микроскопе с точностью $\pm 0,01$ мм при измерении линейных размеров и $\pm 0,05^\circ$ - измерении угловых размеров. Для расчёта НДС составлены соответствующие программы на ЭВМ.

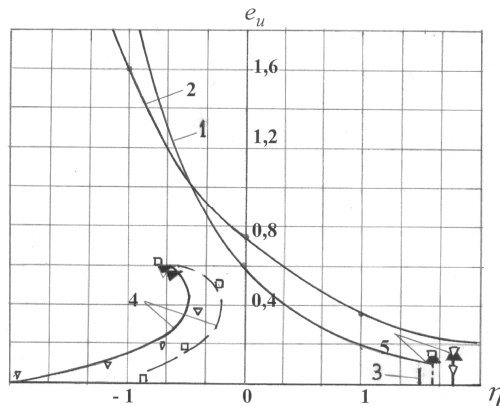
При оценке использованного ресурса пластичности было применено два подхода к решению. Для первого был использован феноменологический критерий деформируемости [4] на основе информации об НДС во время изгиба отвода и диаграммы пластичности исследуемого материала.

Для опасной области были построены пути деформирования (рис.2), т. е. зависимости накопленной интенсивности деформации e_u от показателя напряжённого состояния η с последующей аппроксимацией. Путь деформирования в мягкой области имел сложную форму, поэтому для расчёта использованного ресурса пластичности был применён критерий, основанный на нелинейной теории накопления микрповреждений, учитывающий историю деформирования в виде:

$$\psi = \int_0^{e_u} (1 + f) \frac{e_u^f de_u}{[e_p(e_u)]^{1+f}} \leq 1, \quad (29)$$

где $f = 0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_i}$; $e_p(e_u)$ - значение диаграммы пластичности, которое

соответствует значению e_u пути деформирования. Для расчёта ψ в жёсткой области использован критерий для простых путей деформирования (21).



3 – при гибке прутка, 4 – боковая сторона отвода, 5 – внешняя сторона отвода.

Пунктирная линия – отвод 90° 57×4, сплошная - 90° 89×4

Рис. 2. Диаграммы пластичности сталей 65Г, X18Н9Т (кривые 1,2) и пути деформирования частиц материала в опасных областях.

Приведённые условия разрушения (21) и (29) не в полной мере учитывают направленный характер возникающих при пластическом деформировании повреждений, т. е. не учитывают анизотропию пластичности деформированного металла. Как известно, тела, разрушенные при одном напряжённом состоянии (например, при растяжении), подвергаются последующим значительным пластическим деформациям при ином напряжённом состоянии (например, при сжатии). Поэтому, для второго подхода к определению ψ может быть использован критерий тензорной модели нелинейного накопления повреждений в виде [9]:

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left(0,5 + \frac{e_u}{e_p(\eta)}\right) \beta_{ij} \frac{de_u}{e_p(\eta)}, \quad (30)$$

тогда условие разрушения запишется как:

$$\psi_{ij} \psi_{ij} = 1, \quad (31)$$

где $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u}$ - направляющий тензор скоростей деформации.

Методика расчёта по данному условию изложена в работе [10].

Результаты расчётов использованных ресурсов пластичности при формировании отводов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчётов

Типоразмер отвода		90° 57×4		90° 89×4	
Материал		Сталь 20	Сталь X18H9T	Сталь 20	Сталь X18H9T
Данные диаграммы пластичности	$e_p(\eta = -1)$	1,24	1,6	1,24	1,6
	$e_p(\eta = 0)$	0,62	0,76	0,62	0,76
	$e_p(\eta = 1)$	0,32	0,38	0,32	0,38
ψ	$\psi(5)$	0,65	0,53	0,4	0,31
	$\psi(5')$	0,54	0,46	0,72	0,62

Выводы

Разработаны методики расчета напряжённо-деформированного состояния для процессов формирования гибки прутков и трубчатых поверхностей и представлены примеры расчётов для технологических процессов навивки пружины зубьев граблей ГВР – 6 и крутоизогнутых отводов с использованием деформационной теории пластичности. Получено поле напряжений и деформаций для областей, где пластичность может быть исчерпана.

Для исследованного материала 65Г использованный ресурс пластичности в процессе изготовления зубьев граблей составляет величину $\psi = 0,85$. Это означает, что запас пластичности этого материала в процессе гибки использован на 85%, т.е. изделие ещё в начале эксплуатации может разрушиться, так как величина 0,85 близка к единице. Для улучшения технологического процесса следует взять либо другой материал, у которого e_{np} при $\eta = 1,5$ больше чем у стали 65Г, или изменить технологию, например, процесс гибки производить при более высокой температуре. Наиболее «опасная» область, с точки зрения исчерпания пластичности крутоизогнутого трубчатого изделия, полученного методом холодного пластического деформирования, располагается под его нейтральной осью на участке, которых формируется на завершающем этапе процесса деформирования. В установленной «опасной» области сдвиговые деформации достигают максимальных значений. Информация о величине сдвиговых деформаций в этой области позволит прогнозировать вероятность появления макротрещин или потери устойчивости, проявляющейся в виде гофров, в зависимости от технологических параметров процесса получения отводов.

Представленные в работе результаты расчёта использованных ресурсов пластичности дают возможность с помощью приведённых критериев оценить запас пластичности изделий, изготавливаемых из других материалов без проведения специальных исследований. Это позволит упростить разработку подобных технологических процессов, а также усовершенствовать существующие.

Литература

1. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. - 278 с.
3. Теорияковки и штамповки: Учебное пособие для студентов машиностроительных и металлург. специальностей вузов // Е. П. Унков, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородников и др.; - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1992. - 720 с.
4. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – Киев: Выща школа. Главное издательство. 1983. - 175 с.
5. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. – К.: УМК 130, 1989. – 152 с.
6. Розенберг О. А., Мельниченко В. В., Студенец С. Ф. Процесс формообразования крутоизогнутых стальных отводов методом холодного пластического деформирования // Високі технології в машинобудуванні: Сб. тр. конф., сент. 1997, Алита. – Харьков: ХГПУ, 1997. – С. 46-51.
7. Огородников В. А., Нахайчук О. В., Грушко О. В., Нахайчук В. Г. Механіка деформування в процесі виготовлення крутоізгнутих трубчастих заготовок // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2000. - №2. – С. 66–71.
8. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости. - М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.
9. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла // Физика и техника высоких давлений. – 1983. - №11. – С. 28–32.
10. Огородников В. А., Грушко А. В. Моделирование процесса формообразования круто изогнутых отводов на основе теории деформируемости // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: Зб. наук. пр. - Вип. 6. –Краматорськ, 2000. – С. 5 - 10.