

ПРУЖИНЕНИЕ ДЕТАЛИ КАК ФАКТОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДСТВА ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

¹Винницкий национальный технический университет

В работе выполнены исследования и представлен расчетный аппарат для обеспечения необходимой точности детали, подвергаемой пластическому изгибу. На примере деформирующего протягивания, изгиба стержня и изгиба листовых заготовок показаны способы уменьшения пружинения (разгрузочных деформаций), позволяющих обеспечивать благоприятную технологическую наследственность изделий, полученных холодным пластическим деформированием.

ВСТУПЛЕНИЕ

При обработке металлов давлением формируется технологическое наследство в виде различных факторов: пружинение, остаточные напряжения, наклеп и др. Указанные факторы могут оказывать существенное влияние на эксплуатационные качества изделий, что и предопределяет задачу создания методик количественной оценки указанных факторов. Большинство из перечисленных факторов достаточно изучены [1], однако некоторые из них, например, влияние пружинения на геометрию деталей, получаемых холодным пластическим деформированием, изучены далеко недостаточно.

Целью настоящей работы является создание расчетного аппарата, позволяющего оценивать влияние пружинения на геометрию деталей, получаемых холодным пластическим деформированием.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На примере деформирующего протягивания (дорнования) выясним, как формируются окончательные размеры детали при пластическом деформировании [2]. При разгрузке упругие деформации, называемые в дальнейшем пружинением, могут существенно влиять на точность геометрических размеров и формы детали.

Способ дорнования (рис. 1) заключается в проталкивании полого конуса вдоль цилиндрического канала детали.

При обработке деталей переменной толщины радиальные перемещения точек обработанной поверхности при разгрузке оказываются переменными, и в силу этого получаемая поверхность отличается от круговой цилиндрической. Если инструмент (дорн, протяжка) изготовлен с необходимой точностью, то указанное отклонение поверхности отверстия от цилиндрической определяет точность изделия. На рис. 2 приведена снятая на профилографе круглограммы внутренней поверхности детали.

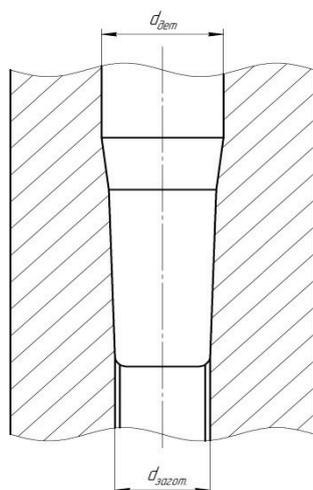


Рисунок 1 – Схема протягивания

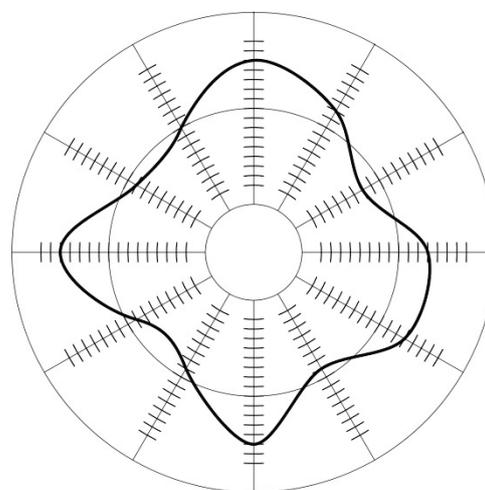


Рисунок 2 – Профилограмма круглограммы детали

Поперечное сечение круглограммы меридионального сечения подшипника показано на рис. 3. Некруглость при заданных размерах детали зависит от величины натяга. Располагая методом расчета указанной зависимости, можно при заданном допуске на некруглость определить предельное значение натяга и, следовательно, исключить брак. В работе [3] оценена точность детали, обрабатываемой дорнованием методом малого параметра.

Рассмотрим пример расчета пружинения стержня из идеально пластичного материала с пределом текучести σ_m и модулем упругости E прямоугольного сечения шириной b и высотой h (рис. 4), изогнутого в условиях чистого изгиба до кривизны ρ .

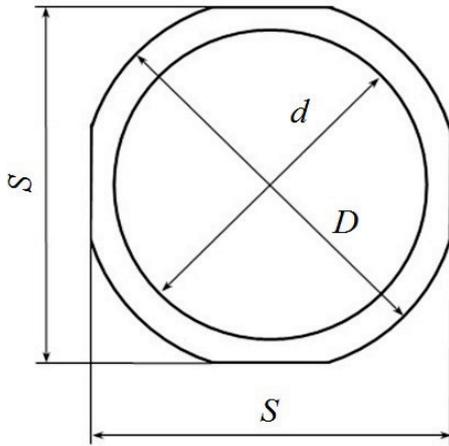


Рисунок 3 – Эскиз меридионального сечения внутреннего кольца подшипника

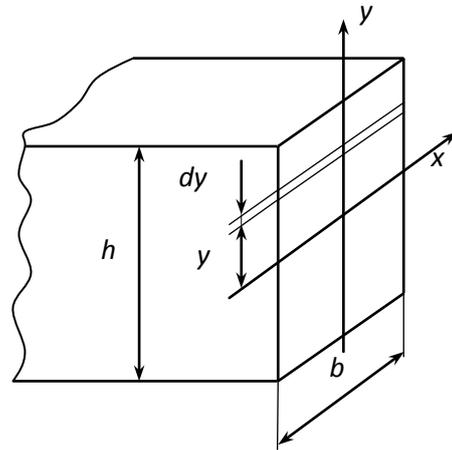


Рисунок 4 – Сечение прямоугольного стержня, подвергнутого чистому изгибу

Деформации при изгибе изменяются по высоте сечения по линейному закону

$$\varepsilon = \rho / y. \quad (1)$$

На упруго-пластической границе деформация

$$\varepsilon = \pm \sigma_m / E. \quad (2)$$

Положение указанной границы определяется координатой

$$y_n = \pm \frac{\sigma_m}{E} \rho. \quad (3)$$

Для случая, когда изгиб сопровождается пластической деформацией, имеем $y_n < \frac{h}{2}$.

Напряжения в верхней половине поперечного сечения стержня равны по величине и обратны по знаку напряжениям, действующим в нижней половине сечения. Поэтому, определяя изгибающий момент, удвоим момент напряжения в верхней части сечения относительно нейтральной оси:

$$M_x = 2b \int_0^{h/2} \sigma \cdot y dy \quad (4)$$

По сечению напряжения изменяются по следующему закону:

- при $0 \leq y \leq y_n$ $\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \rho \cdot y$;
- при $y_n \leq y \leq h/2$ $\sigma = \sigma_m$.

Следовательно,

$$M_x = 2b \left[E\rho \int_0^h y^2 dy + \sigma_m \int_{y_n}^{h/2} y dy \right] = \sigma_m b \left(\frac{h^2}{4} - \frac{\sigma_m^2}{3E^2 \rho^2} \right). \quad (5)$$

Пружинение оценим величиной уменьшения кривизны при разгрузке $\Delta\rho$. При упругой разгрузке получим

$$\Delta\rho = \frac{M_x}{EI_x} = -\frac{3\sigma_m}{Eh} + 4\left(\frac{\sigma_m}{Eh}\right) \frac{1}{\rho^2}, \quad (6)$$

где $I_x = \frac{bh^3}{12}$ – момент инерции поперечного сечения относительно оси x .

Остаточная кривизна стержня после разгрузки

$$\rho_0 = \rho + \Delta\rho = \rho - \sqrt{-3\frac{\sigma_m}{Eh} + 4\left(\frac{\sigma_m}{Eh}\right)^2 \frac{1}{\rho^2}}. \quad (7)$$

Пусть, например, требуется назначить кривизну оправки, при изгибе по которой будет получен стержень заданной кривизны. Под кривизной получаемого стержня понимается остаточная кривизна ρ_0 , а кривизна оправки связана с величиной ρ . Ее можно определить из уравнения (6), поскольку кривизна ρ_0 известна.

На рис. 5 результаты представлены графически. Пока изгиб не вызывает пластических деформаций, т. е. при

$$\rho < \rho_n = \frac{2\sigma_m}{Eh}, \quad (8)$$

пружинение равно кривизне при изгибе ρ . При дальнейшем увеличении ρ пружинение нарастает с убывающей интенсивностью, асимптотически приближаясь к величине

$$\Delta\rho' = 3\frac{\sigma_m}{Eh}, \quad (9)$$

определяемой из уравнения (6) при $\rho \rightarrow \infty$ и соответствующей пружинению стержня, у которого всё поперечное сечение охвачено пластической деформацией.

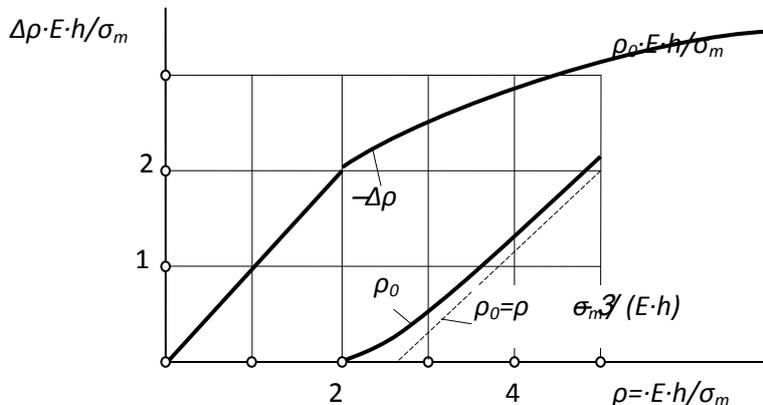


Рисунок 5 – График, отображающий остаточную кривизну стержня после разгрузки

Остаточная кривизна появляется лишь при $\rho > \rho_n$ и определяется уравнением (7). С возрастанием кривизны ρ график функции $\rho_0(\rho)$ асимптотически приближается к прямой, соответствующей уравнению

$$\rho_0 = \rho - 3 \frac{\sigma_m}{Eh}. \quad (10)$$

Это уравнение можно использовать при больших кривизнах вместо более громоздкой формулы (7).

Формула (10) является точной в случае, если всё поперечное сечение стержня охвачено пластической деформацией. Применительно к этому случаю получим оценку пружинения стержня симметричного поперечного сечения (ось x является осью симметрии). При этом изгибающий момент

$$M_x = \int_F \sigma y dF = 2\sigma_m S, \quad (11)$$

где S – статический момент верхней половины сечения относительно оси x (ось y направлена вверх). В случае круглого сечения диаметром d

$$S = d^3/12.$$

При этом пружинение

$$\Delta\rho = -2 \frac{\sigma_m S}{EI_x}, \quad (12)$$

следовательно, остаточная кривизна

$$\rho_0 = \rho - 2 \frac{\sigma_m S}{EI_x}. \quad (13)$$

Рассмотрим также изгиб листа. Пусть лист толщиной h из идеально-пластичного материала изгибается в условиях чистого изгиба до кривизны ρ . В локальной системе координат, показанной на рис. 6,

$$\varepsilon_z = \rho_2 y; \quad \varepsilon_x = 0; \quad \sigma_y = 0;$$

продольная деформация $\varepsilon_x = 0$, когда $l/h > 0$, а напряжения $\sigma_y = 0$ при $h \cdot \rho < 0,2$. Ограничимся рассмотрением области листа, расположенной под нейтральным слоем. При сделанных допущениях принимаем, что нейтральный слой совпадает с серединной поверхностью, формируемой из цилиндрической оболочки, следовательно,

$$0 \leq y \leq h/2.$$

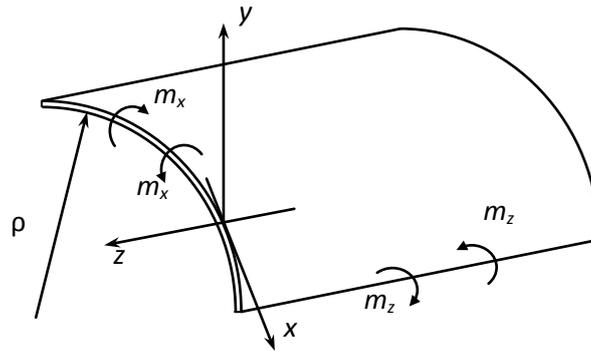
В пластической области

$$\sigma_x = 2\sigma_z = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_m, \quad (14)$$

что следует из условия пластичности

$$\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z = \sigma_m^2, \quad (15)$$

при равенстве $\sigma_x = 2\sigma_z$, следующем из условия несжимаемости.

Рисунок 6 – Схема чистого изгиба листа толщиной h

В упругой области напряжения определим деформацию, следуя обобщенному закону Гука,

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_x). \quad (16)$$

Из (16) следует, что при $\varepsilon_z = 0$

$$\sigma_z = \mu\sigma_x. \quad (17)$$

В свою очередь,

$$\varepsilon_x = \rho \cdot y = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_z). \quad (18)$$

Следовательно, в упругой области

$$\sigma_x = \frac{1}{\mu}\sigma_z = \frac{E}{1-\mu^2}\rho_z y. \quad (19)$$

Координату y_n , определяющую положение упруго-пластической границы, найдем из условия, что напряжения в упругой области (19) удовлетворяют условию пластичности (15):

$$y_n = \frac{\sigma_m}{E} = \frac{(1-\mu^2)}{\sqrt{1-\mu+\mu^2}} \cdot \frac{1}{\rho_z}. \quad (20)$$

Изгибающий момент, приходящийся на единицу длины,

$$m_z = 2 \int_0^{h/2} \sigma_x y dy = 2 \left(\frac{E}{1-\mu^2} \rho_z \int_0^{y_n} y^2 dy + \frac{\sqrt{3}}{2} \int_{y_n}^{h/2} y dy \right). \quad (21)$$

Учитывая равенство (20), получим,

$$m_z = \frac{\sqrt{3}}{8} \sigma_m h^2 - a \frac{\sigma_m^3}{E^2 \rho_z}, \quad (22)$$

где

$$a = \frac{(1-\mu^2)^2}{1-\mu+\mu^2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{2}{3\sqrt{1-\mu+\mu^2}} \right).$$

Для сталей при $\mu = 0,3$, $a = 0,14$.

Напряжения σ_z создают также изгибающий момент. Учитывая, что в упругой области $\sigma_z = \mu\sigma_x$, а в пластической области $\sigma_z = \frac{\sigma_x}{2}$, определим интенсивность этого момента по формуле (21). Умножив первое слагаемое правой части формулы (21) на μ , а второе слагаемое – на $1/2$, получим

$$m_z = \frac{\sqrt{3}}{16} \sigma_m h^2 - b \frac{\sigma_m^3}{E^2 \rho_z^2}, \quad (23)$$

где

$$b = \frac{1-\mu^2}{1-\mu+\mu^2} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{4} - \frac{2\mu}{3\sqrt{1-\mu+\mu^2}} \right), \text{ при } \mu = 0,3, b = 0,25.$$

Рассмотрим теперь разгрузку. Предположим, что при разгрузке уменьшается кривизна полученной цилиндрической оболочки ρ_z на величину $\Delta\rho_z$. При этом разгрузочные напряжения распределены по толщине по линейному закону, аналогичному (19),

$$\sigma_x' = \frac{E}{1-\mu^2} \Delta\rho_z y. \quad (24)$$

Приравняв момент этих напряжений моменту напряжений σ_x , взятому с обратным знаком,

$$m_z' = 2 \int_0^{h/2} \sigma_x' y dy = \frac{E}{1-\mu^2} \Delta\rho_z \frac{h^3}{12} = -m_z,$$

получим

$$\Delta\rho_z = \frac{3\sqrt{3}(1-\mu^2)\sigma_m}{2Eh} + \frac{12a(1-\mu^2)\sigma_m^3}{E^3 h^3 \rho_z^2}. \quad (25)$$

Интенсивность изгибающего момента σ_z' можно определить следующим образом:

$$m_x' = \mu m_z' = -\mu m_z. \quad (26)$$

Следовательно,

$$m_x + m_x' = (0,5 - \mu) \left[\frac{\sqrt{3}}{8} \sigma_m h^2 - \frac{\sqrt{3}(1-\mu^2)}{1-\mu+\mu^2} \cdot \frac{\sigma_m^3}{E^2 \rho_z^2} \right]. \quad (27)$$

Поскольку $m_x > 0$ при $\mu < 0,5$ полученная сумма положительна.

Таким образом, на примере гибки пластины можно показать расчетным путём – каким образом скорректировать инструмент, чтобы получить деталь с требуемой геометрией.

На примере дорнования можно показать, что некруглость отверстия, возникающего при переменной по окружности толщине протягиваемой детали, монотонно зависит от натяга ($N = d_{\text{дет}} - d_{\text{загот}}$) (см. рис. 1).

Определив эту зависимость, по допускаемой некруглости отверстия устанавливают предельный натяг и производят протягивание при натяге, меньше предельного.

Один из эффективных методов уменьшения пружинения состоит в выравнивании напряжений по толщине или по поперечному сечению (если речь идёт о стержнях) перед разгрузкой от технологических усилий. Покажем это на примере изгиба стержня симметричного поперечного сечения из идеально пластичного материала.

На рис. 7 показана диаграмма растяжения-сжатия материала стержня. Пренебрегая эффектом Баушингера ($\beta = 1$), достаточно растянуть стержень в изогнутом состоянии до дополнительной деформации $\Delta \varepsilon = 2\sigma_m/E$, (для малоуглеродистой стали это составит $\sim 0,3\%$).

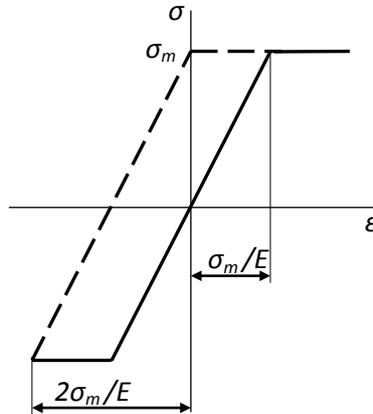


Рисунок 7 – Диаграмма растяжения-сжатия материала стержня

Чтобы во всех точках поперечного сечения, в которых материал был при изгибе сжат, возникли после разгрузки растягивающие напряжения, равные пределу текучести.

В результате, по всему поперечному сечению будут действовать одинаковые напряжения, равные σ_m . В силу этого изгибающий момент оказывается равным нулю.

ВЫВОДЫ

1. Разработан расчетный аппарат, с помощью которого оценивают параметры инструмента, обеспечивающие необходимую точность детали, подвергаемой пластическому изгибу.
2. На примере деформирующего протягивания, изгиба листовых заготовок, чистого изгиба стержня симметричного поперечного сечения показаны способы уменьшения пружинения (разгрузочных деформаций), позволяющие с помощью разработанных в работе расчетных соотношений обеспечивать благоприятное технологическое наследие изделий, полученных холодным пластическим деформированием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.
2. Цеханов Ю. А. Механика деформирующего протягивания как научная основа качества деталей и работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями : дис... докт. техн. наук: 05.02.08 / Ю. А. Цеханов. – Воронеж, 1993. – 385 с.
3. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.

REFERENCES

1. Yascheritsyin P. I. Tehnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroenii / P. I. Yascheritsyin, E. V. Ryizhov, V. I. Averchenkov – Minsk : Nauka i tehnika, 1977. – 256 p.
2. Tsehanov Yu. A. Mehanika deformiruyushego protyagivaniya kak nauchnaya osnova kachestva detaley i rabotosposobnosti instrumenta s iznosostoykimi pokrytityami : dis... dokt. tehn. nauk: 05.02.08 / Yu. A. Tsehanov. – Voronezh, 1993. – 385 p.
3. Del' G. D. Tehnologicheskaya mehanika / G. D. Del' – M. : Mashinostroenie, 1978. – 174 p.

В. А. Огородников¹, Т. Ф. Архіпова¹

ПРУЖИНУВАННЯ ДЕТАЛІ ЯК ФАКТОР ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ ПРИ ХОЛОДНІЙ ОБРОБЦІ ТИСКОМ

¹Вінницький національний технічний університет

В роботі виконано дослідження та представлений розрахунковий апарат для забезпечення необхідної точності деталі, що піддається пластичному згину. Метою представленої роботи є розробка розрахункового апарату, який дозволить оцінити вплив пружинування на геометрію деталей, що отримують холодним пластичним деформуванням.

На прикладі деформуючого протягування, згину стрижня та згину листових заготовок показано способи зменшення пружинування (розвантажувальних деформацій), що дозволяють забезпечити сприятливу технологічну спадковість виробів, які отримано холодним пластичним деформуванням.

Ключові слова: пружинування; технологічна спадковість; дорнування; холодне пластичне деформування; пружні та пластичні деформації; напруження; кривина.

Огородніков Віталій Антонович, доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru, тел. +380675897115, Україна, 21000, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, к. 1115.

Архіпова Тетяна Федорівна, кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ, e-mail: tfarhipova@gmail.com, тел. +380970259925, Україна, 21000, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, к. 1109.

V. A. Ogorodnikov¹, T. F. Arkhipova¹

SPRINGING DETAILS AS A FACTOR IN TECHNOLOGICAL INHERITANCE OF COLD PLASTIC FORMING

¹Vinnitsia National Technical University

Researches are in-process executed and a calculation vehicle is presented for providing of necessary exactness of detail, exposed to the plastic bend. The aim of this work is to create a settlement system, which allows to estimate the effect of the geometry of the springing parts produced cold plastic deformation.

On the example of the deforming reaching, bend of bar and bend of sheet purveyances the methods of diminishing of springing (unloading deformations) are presented, allowing to provide favourable technological heredity wares, got a cold deforming.

Keywords: springing; technological heredity; deforming processes; cold flowage; resilient and plastic deformations; tensions; curvature.

Ogorodnikov Vitaly Antonovych, Doctor of Technical Science, Professor, Vinnitsia National Technical University, Professor of Strength of Materials and Applying Mechanics Department VNTU, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru, tel. +380675897115, Ukraine, 21000, Vinnitsya, Khmel'nitske shosse, 95, r. 1115.

Arkhipova Tetyana Fedorivna, Ph.D., Vinnitsia National Technical University, assistant professor Strength of Materials and Applying Mechanics Department VNTU, e-mail: tfarhipova@gmail.com, tel. +380970259925, Ukraine, 21000, Vinnitsya, Khmel'nitske shosse, 95, r. 1115.

V. A. Ogorodnikov¹, T. F. Arkhipova¹

ПРУЖИНЕНИЕ ДЕТАЛИ КАК ФАКТОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДСТВА ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

¹Винницкий национальный технический университет

В работе выполнены исследования и представлен расчетный аппарат для обеспечения необходимой точности детали, подвергаемой пластическому изгибу. Целью настоящей работы является создание расчетного аппарата, позволяющего оценивать влияние пружинения на геометрию деталей, получаемых холодным пластическим деформированием.

На примере деформирующего протягивания, изгиба стержня и изгиба листовых заготовок показаны способы уменьшения пружинения (разгрузочных деформаций), позволяющих обеспечивать благоприятную технологическую наследственность изделий, полученных холодным пластическим деформированием.

Ключевые слова: пружинение; технологическая наследственность; дорнование; холодное пластическое деформирование; упругие и пластические деформации; напряжение; кривизна.

Огородников Виталий Антонович, доктор технических наук, профессор, Винницкий национальный технический университет, профессор кафедры сопротивления материалов и прикладной механики ВНТУ, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru, тел. +380675897115, Украина, 21000, г. Винница, Хмельницкое шоссе, 95, к. 1115.

Архипова Татьяна Федоровна, кандидат технических наук, доцент, Винницкий национальный технический университет, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики ВНТУ, e-mail: tfarhipova@gmail.com, тел. +380970259925, Украина, 21000, г. Винница, Хмельницкое шоссе, 95, к. 1109.