

Тітов В. А.
Максимів І. М.
Герасимов В. О.

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ОБТИСКУ ТОВСТОСТІННОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЗАГОТОВКИ

Проведено детальний аналіз процесу обтиску товстостінної циліндричної заготовки. Зазначений процес є важливим для виробництва різних компонентів, таких як циліндри, труби та інші вироби з циліндричною формою. Ця робота дозволяє краще розуміти механічну поведінку матеріалів під час обтиску. Метою дослідження є аналіз точності внутрішньої поверхні циліндричної заготовки, яка формується у результаті зазначеного технологічного процесу. Аналіз базується на використанні припущень про пластичну та пружну поведінку матеріалу заготовки. Важливим аспектом є також припущення про плоский деформований стан та об'ємний напружений стан, що враховується при розгляді процесу формування зони пластичних та пружних деформацій в поперечному перерізі заготовки. Застосовані припущення про пластичність та пружність матеріалу, а також про плоский деформований стан та об'ємний напружений стан, дозволили розглянути процес формування зони пластичних та пружних деформацій в поперечному перерізі заготовки. З урахуванням цих особливостей були запропоновані основні рівняння для розрахунку процесів деформування та формоутворення. Отримані результати дозволяють описати процеси обтиску та деформування протягування за допомогою кривих деформування, що спрощує аналіз та розрахунок цих процесів. Встановлена необхідність проведення технологічних процесів з метою мінімізації пружиніння після деформування після виникнення пластичних деформацій по всій товщині заготовки.

Ключові слова: *циліндрична заготовка, інтенсивність напружень, інтенсивність деформацій, пружна деформація, пластична деформація, обтиск.*

При проектуванні технологічних процесів та інструменту для обтиску циліндричної поверхні заготовки по оправці важливою задачею є прогнозування точності внутрішньої поверхні циліндричної заготовки ствола. В роботах [1, 2] виконано дослідження операції обтиску без потоншення стінки порожнистої циліндричної оболонки, а також встановлені залежності впливу технологічних параметрів і геометрії робочого інструменту на напружений та деформований стан. В роботі [3] наведені результати статистичних досліджень точності внутрішніх отворів у порожнистих циліндрах. Вирішення цієї задачі може бути отримано аналітично при розгляді процесу деформування на активній стадії – при навантаженні заготовки. В роботі [4] проведено дослідження силових режимів процесу обтиску циліндричних заготовок та показано вплив геометричних факторів на силові режими процесу обтиснення.

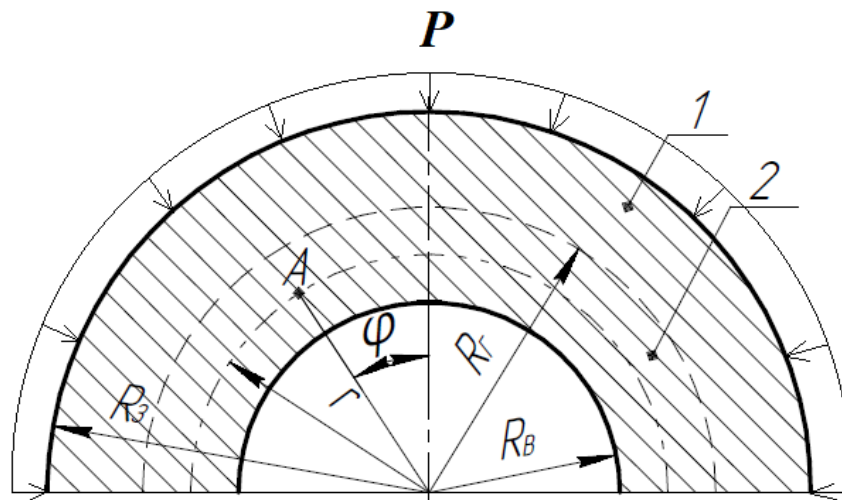
Метою роботи є дослідження та аналіз особливостей процесу обтиску товстостінної циліндричної заготовки.

Аналіз напружено-деформованого стану матеріалу в цьому контексті є ключовим для забезпечення необхідної деформації без пошкоджень. Після проведення необхідних обчислень і аналізу деформацій та напружень в матеріалі, можна отримати результати, які допоможуть визначити, як досягнути бажаної форми циліндричної заготовки, а також визначити якісні характеристики отриманого виробу, такі як розмір, геометрія, якість поверхні тощо. У процесі обтиску важливо визначити, які навантаження діють на заготовку та які деформації вона пройшла.

В процесі аналізу вважати, що заготовка в осередку деформації знаходиться в плоскому деформованому стані та об'ємному напруженому стані. Це припущення не вносить великих похибок, тому що деформації заготовки невеликі, але достатні для обтиску заготовки по оправці. Тому наступне припущення приймаємо відносно моделі матеріалу – вважати, що матеріал заготовки пружно-пластичний. Враховуючи, що деформування заготовки проводиться у вузькому інтервалі деформацій, вважати матеріал ідеально пластичним, текуче значення границі текучості σ_{s_i} якого визначається в рамках підходу методу змінного параметра пружності.

Вважається, що для розглянутого процесу обтиску при активному навантаженні рівномірно розподіленим тиском P існують дві зони в поперечному перерізі заготовки, які знаходяться в пружному та пластичному станах [5]. Розглянуто кінематичні особливості деформування циліндричної заготовки, схема цього процесу представлена на рис. 1.

Для розрахунку використано основні положення теорії пластичної течії [6].



1 – зона пружних деформацій; 2 – зона пластичних деформацій

Рис. 1. Схема розвитку пластичних деформацій по товщині заготовки при деформуванні

При теоретичному аналізі процесу приймаємо основні припущення:

- вважаємо, що заготовка, яка деформується, має довжину значно більшу, ніж діаметр, тому деформований стан приймаємо плоский;
- напружений стан – об’ємний;
- вважаємо, що заготовка деформується пружно-пластично. Пластична деформація супроводжується пружними деформаціями. Тому в тілі заготовки розвиваються пружні та пластичні області;
- приймаємо модель матеріалу пружно-пластичну;

Для довільно взятого перерізу заготовки компоненти вектору швидкостей деформації з урахуванням прийнятих припущень будуть мати наступний вид:

$$V_r = \frac{V_0 \cdot R_B}{r}; V_\varphi = 0; V_z = 0, \quad (1)$$

де V_r – швидкість переміщення матеріальних часток в радіальному напрямку;

V_0 – швидкість матеріальних часток в радіальному напрямку на граничних поверхнях заготовки.

При цьому швидкість матеріальних часток на зовнішній поверхні заготовки для процесу обтиску дорівнює $V_0 \leq 0$.

Враховуючи, що в роботі розглянуто процеси з малим переміщенням матеріальних точок, прийнято припущення, що радіальна складова V_r на зовнішній та внутрішній поверхні циліндричної заготовки дорівнюють одне одному $V_{rB} = V_{rH} = V_0$. Це значить, що товщина заготовки при формоутворенні практично не змінюється. Це припущення незначним чином впливає на загальний розподіл напружень і деформацій, тому що перерозподіл zdeформованих об’ємів на внутрішній поверхні заготовки за рахунок формоутворення полігонального рельєфу незначний і не перевищує 3 % [7].

Тому на величину пружної деформації буде впливати загальний розподіл напружень і деформацій по товщині стінки товстостінної заготовки. Цей розподіл і буде визначати точність по діаметру формуючої заготовки. Для поля швидкостей переміщень (1) компоненти тензора швидкостей деформацій будуть мати вигляд:

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{V_0 \cdot R_B}{r^2} = -\varepsilon_{\varphi\varphi}; \varepsilon_{\phi\phi} = 0 \quad (2)$$

Інтенсивність швидкостей деформацій визначається залежністю:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_0 \cdot R_B}{r^2} \quad (3)$$

Напруження, що діють в пластично деформованому стані даного перерізу визначаємо з залежностей між девіаторами напружень і швидкостей деформацій:

$$D_\sigma = 2\mu_i D_\varepsilon \quad (4)$$

або в скалярному виді для розглянутого випадку:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{rr}; \\ \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{\varphi\varphi}; \\ \sigma_{zz} = \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{zz}; \\ \tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi z} = \tau_{rz} = 0, \end{cases} \quad (4a)$$

де σ – середнє напруження;

Коефіцієнт жорсткості:

$$\mu_i = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{r^2}{R_B} \cdot \frac{\sigma_S}{V_0} \quad (5)$$

σ_S – напруження текучості.

Середнє напруження σ визначається з рівняння рівноваги, яке для осесиметричної задачі в циліндричній системі координат має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial r} = -\mu \left[\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V_r}{r^2} \right] - 2 \frac{\partial \mu}{\partial r} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial r} \\ - \frac{1}{r} \frac{\partial \mu}{\partial \varphi} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right] - \frac{\partial \mu}{\partial z} \left[\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right] \\ \frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} = 0; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial z} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

При вирішенні системи (6) з урахуванням (1), (3) та (5) отримуємо середнє напруження:

$$\sigma = -\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \ln r + c. \quad (6a)$$

Середнє напруження дозволяє записати залежність для радіальних напружень. Для цього після підстановки (6a) в (4a) отримуємо:

$$\sigma_{rr} = -\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s(\ln r - 1) + c. \quad (7)$$

Формула (7) визначає розподіл напружень в пластичній зоні деформуємої циліндричної заготовки при $r = R_r$ та $\sigma_{rr_{ni}} = \sigma_{rr_{np}}$.

Константу “с” визначаємо з умови рівності радіальних напружень σ_{rr} на зовнішній поверхні при деформуючому тиску. Гранична умова для визначення константи “С” записується наступним чином:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -P \text{ та } r = R_3. \\ \sigma_{kk} &= -\frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}}(\ln R_3 - 1) + C = -P. \end{aligned} \quad (7a)$$

$$C = -P + \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s(\ln R_3 - 1). \quad (7b)$$

Константу C підставляємо в залежність (7), отримуємо з врахуванням знаку стиску σ_{rr} :

$$\sigma_{rr} = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_3}{r} - P. \quad (7b)$$

$$\sigma_{rr_{np}} = \sigma_{rr_{ni}}. \quad (8)$$

Величина напруження $\sigma_{rr_{np}}$ у пружній зоні визначається відповідно до закону Гука:

$$\begin{aligned} E \cdot e_{rr} &= \sigma_{rr} - \mu(\sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz}) \\ E \cdot e_{\varphi\varphi} &= \sigma_{\varphi\varphi} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{rr}), \end{aligned} \quad (9)$$

де E – модуль пружності;

μ – коефіцієнт Пуассона;

e_{rr} і $e_{\varphi\varphi}$ – компоненти тензора деформацій, відповідно в радіальному та тангенціаль-ному напрямках.

Змінимо рівняння (9) – відніmemo почленно з першого друге рівняння:

$$\begin{aligned} E(e_{rr} - e_{\varphi\varphi}) &= (1 + \mu)(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) \\ \text{або } \sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{E}{1 + \mu}(e_{rr} - e_{\varphi\varphi}). \end{aligned} \quad (10)$$

З іншого боку, напруження в пружній зоні для товстостінного циліндру, який навантажений зовнішнім тиском, визначається за формулами Ляме:

$$\sigma_{rr} = \frac{R_3^2}{R_3^2 - R_B^2} \cdot \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right) \cdot p; \quad (11)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{R_3^2}{R_3^2 - R_B^2} \cdot \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \cdot p;$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}}{2},$$

де p – тиск, що діє на зовнішній поверхні пружно деформованого шару:

$$p = \sigma_{rr} \text{ при } r = R_3 \quad (12)$$

Складові деформацій на поверхні розділу пружної та пластичної зон визначається формулами:

$$e_{\varphi\varphi} = -e_{rr} = \ln \frac{R_r}{R_{r0}} \quad (13)$$

Спільне рішення рівнянь (10), (11) з урахуванням (13) дозволяє визначити радіальне напруження на граничній поверхні $\sigma_{rr_{np}}$:

$$\sigma_{rr_{np}} = \frac{2E}{1 + \mu} \cdot \left[\frac{R_3^2}{R_3^2 - R_B^2} \right] \cdot \ln \frac{R_{r0}}{R_r} \quad (14)$$

де R_{r0} – радіус граничної поверхні в початковий момент деформування.

З використанням граничної умови (8) отримуємо формули для визначення напружень в пластично деформованій зоні:

$$\sigma_{rr} = \frac{2 \cdot \sigma_L}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{R_r} + \frac{2E}{1 + \mu} \left[\frac{R_3^2}{R_3^2 - R_B^2} \right] \cdot \ln \frac{R_{r0}}{R_r},$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{2 \cdot \sigma_S}{\sqrt{3}} \left[1 + \ln \frac{r}{R_r} \right] + \frac{2E}{1 + \mu} \left[\frac{R_3^2}{R_3^2 - R_B^2} \right] \cdot \ln \frac{R_{r0}}{R_r}, \quad (15)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{1}{2} [\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}].$$

Радіус поверхні розділу пружної та пластичної зон з достатнім ступенем точності можна визначити з співвідношення:

$$\ln \frac{R_r}{R_{r0}} = \frac{\sigma_S}{E}. \quad (16)$$

Звідки після потенціювання:

$$\frac{R_r}{R_{r0}} = e^{\frac{\sigma_S}{E}} = k. \quad (17)$$

Виходячи з закону сталості об'єму, поточне значення радіуса поверхні розділу R_r визначаємо в залежності з її початковим положенням R_{r0} :

$$R_r = \sqrt{(R_{B_0} + V_0 t)^2 - R_{B_0}^2}, \quad (18)$$

де t – параметр часу, R_{B_0} – початковий радіус внутрішньої поверхні заготовки. Тоді товщина пластично деформованого шару буде визначатись відношенням:

$$\delta_{пл} = \delta_0 \cdot \left[\sqrt{\frac{(R_{B_0} + V_0 t)^2}{k^2 - 1}} - R_{B_0} \right] \quad (19)$$

де δ_0 – товщина стінки заготовки.

Відношення (19) дозволяє побудувати залежність товщини пластично деформованого шару від зазору між внутрішньою поверхнею заготовки та оправкою, яка показана на рис. 2. Величина зазору визначається для процесу деформуючого протягування:

$$\Delta = \frac{1}{2}(R_B - R_{B_0}) = \frac{1}{2}(R_{B_0} + V_0 t - R_{B_0}) = \frac{V_0 t}{2}; \quad (20)$$

а для обтиску заготовки:

$$\Delta = \frac{1}{2}(R_B - R_{B_0}) = \frac{1}{2}(R_{B_0} + R_{B_0} - V_0 t) = \frac{V_0 t}{2}; \quad (21)$$

$V_0 t$ – радіальні приміщення матеріальних часток на границі внутрішньої поверхні заготовки при обтиску (зміні радіусу), величина яких визначає зміни внутрішнього діаметру.

Визначаємо залежність величини пластичної зони від радіальних переміщень при зміні внутрішнього діаметру. Внутрішній діаметр заготовки становить 9 мм, зовнішній діаметр 20 мм, тобто товщина стінки становить 5,5 мм. Матеріал заготовки: 30ХНМА.

$\frac{\delta_0}{R_0}$ – відносна товщина заготовки, при умові що $\frac{\delta_0}{R_0} \leq 2.5$ [8]

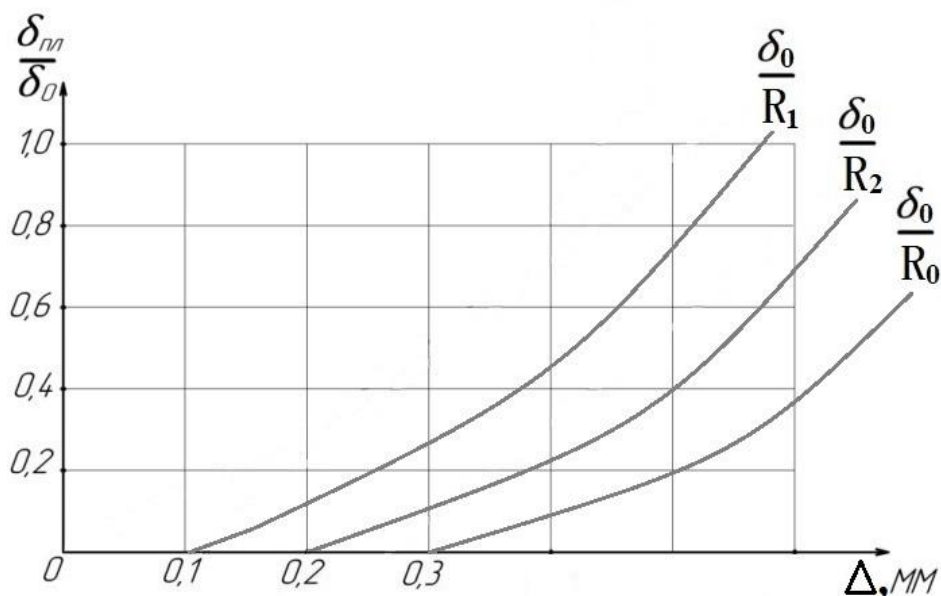


Рис. 2. Залежність відносної товщини пластичного деформованого шару та відносної товщини заготовки від зміни внутрішнього діаметру

Виходячи з співвідношень (20) та (21) можна зробити висновок, що величина пластичної деформації залежить від зазору між внутрішнім діаметром заготовки та оправкою при обтиску. На рис. 2 зображено залежність параболічного характеру, головною особливістю якої є те, що при збільшенні зазору між внутрішньою оправкою та внутрішнім радіусом заготовки збільшується відносна товщина пластично деформованого шару.

ВИСНОВКИ

Виконано теоретичний аналіз процесу обтиску товстостінної циліндричної заготовки радіальним рівномірно розподіленим по її зовнішній поверхні тиском. Для теоретичного аналізу використано основні рівняння теорії пружності та замкнута система рівнянь теорії пластичної течії. Використання поля швидкостей переміщень матеріальних часток заготовки при деформуванні забезпечило зв'язок функцій розвитку пластичних деформацій в тілі заготовки від параметру часу деформування (зміні зазору).

Практичне значення представляють формули (15) для визначення напруженого стану в пластично деформованій зоні заготовки в залежності від параметра обтиску, введеного логарифмічною функцією відношення зміни граничного радіусу відносно його початкового значення. Це забезпечує прогнозування напруженого стану заготовки при проектуванні процесів обтиску товстостінних циліндричних заготовок по жорстким оправкам.

Графічно дана оцінка залежності розвитку пластично деформованого шару від зміни внутрішнього діаметра заготовки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романов П.В. Напряженно-деформированное состояние полой цилиндрической оболочки при обжиме. *Известия Тульского государственного университета* 2019. 12. С. 136-138.
2. Митин О.Н. Математическая модель обжима трубной заготовки. *Известия Тульского государственного университета*. 2019. 12. С. 78-88.
3. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Точность глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах, обрабатываемых дорнованием с большими натягами. *Известия Томского политехнического университета*. 2011. 2. С.30-32.
4. Яковлев С.С., Нгуен К.Х. Исследование силовых режимов процесса обжима цилиндрических заготовок. *Известия Тульского государственного университета*. 2014. 4. С 63-69.
5. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. Киев: Наукова думка. 1981. 288 с.
6. Тітов В.А., Шамарін Ю.Є., Долматов А.І. і інш. Високошвидкісні методи обробки металів тиском: Підручник. Київ: КВІЦ. 2010. 304 с.
7. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка. 1976. 416 с.
8. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Москва: Машиностроение. 1975. 400 с.

REFERENCES

1. Romanov P.V. Stress-strain state of a hollow cylindrical shell during crimping. *News of Tula State University*. 2019. 12, pp. 136–138. (in Russian).
2. Mitin O.N. Mathematical model of crimping a pipe blank. *News of Tula State University*. 2019. 12, pp. 78–88. (in Russian).
3. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arlyapov A.Yu. Precision of deep holes of small diameter in hollow thick-walled cylinders processed by mandrel processing with high interference forces. *News of Tomsk Polytechnic University*. 2011. 2, pp. 30–32. (in Russian).
4. Yakovlev S.S., Nguyen K.H. Study of power modes of the process of crimping cylindrical workpieces. *News of Tula State University*. 2014. 4, pp. 63-69. (in Russian).
5. Rosenberg O.A. Mechanics of interaction of the tool with the product during deforming broaching. Kyiv: Naukova Dumka, 1981. 288 p. (in Russian).
6. Titov V.A., Shamarin Yu.I., Dolmatov A.I., et al. High-quality methods of processing metals with a vice: Textbook. Kiev: KVITs. 2010. 304 p. (in Ukrainian).
7. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Deformation and strength of materials under complex stress state. - Kyiv: Naukova Dumka. 1976. 416 p. (in Russian).

8. Malinin N.N. Applied theory of plasticity and creep: Textbook for university students. Moscow: Mechanical Engineering. 1975. 400 p. (in Russian).

Titov V., Maksymiv I., Herasimov V. Features of the process of crimping a thick-walled cylindrical workpiece.

The article provides a detailed analysis of the process of crimping a thick-walled cylindrical workpiece. This process is important for the production of various components such as cylinders, pipes and other products with a cylindrical shape. This work allows a better understanding of the mechanical behavior of materials during crimping. The purpose of the study is to analyze the accuracy of the inner surface of the cylindrical workpiece, which is formed as a result of the specified technological process. The analysis is based on the use of assumptions about the plastic and elastic behavior of the workpiece material. An important aspect is also the assumption of a flat deformed state and a three-dimensional stressed state, which is taken into account when considering the process of forming the zone of plastic and elastic deformations in the cross section of the workpiece. The applied assumptions about the plasticity and elasticity of the material, as well as about the flat deformed state and the volumetric stressed state, allowed us to consider the process of forming the zone of plastic and elastic deformations in the cross section of the workpiece. Taking these features into account, basic equations were proposed for calculating deformation and forming processes. The obtained results make it possible to describe the processes of crimping and deforming drawing with the help of deformation curves, which simplifies the analysis and calculation of these processes. The need to carry out technological processes in order to minimize springing after deformation after the occurrence of plastic deformations throughout the thickness of the workpiece has been established.

Keywords: cylindrical workpiece, stress intensity, deformation intensity, elastic deformation, plastic deformation, crimping.

Тітов Вячеслав Андрійович – д-р техн. наук, професор НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Titov Vyacheslav – Dr Sc (Engineering), Full Professor, Igor Sikorsky KPI

E-mail: vat.kpi@gmail.com.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4234-6961>

Максимів Ігор Миколайович – аспірант НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Maksymiv Igor – PhD student, Igor Sikorsky KPI

E-mail: igormaxymiv88@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6417-3616>

Герасимов Володимир Олегович – магістрант НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Herasymov Volodymyr – student Igor Sikorsky KPI.

E-mail: nau12@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4167-7629>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»), м. Київ

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (NTUU "Igor Sikorsky KPI"), Kyiv

Стаття надійшла до редакції 10.09.23 р.