

Міністерство освіти і науки України

Державний вищий навчальний заклад  
«Приазовський державний технічний університет»  
(ДВНЗ «ПДТУ»)

## **НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО**

Міжвузівський тематичний збірник наукових праць

Маріуполь – Краматорськ – Харків –  
Запоріжжя – Київ – Дніпро

**Випуск 23**

**Маріуполь**

**2020**

УДК 621.981.1

Кухар В. В., Нагнібеда М. М.

## НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ГНУТТІ З ПОСЛІДОВНИМ ЗМЕНШЕННЯМ ВНУТРІШНЬОГО РАДІУСУ

У роботі виконано стислий огляд методів дослідження залишкових напружень та деформацій при гнутті листових заготовок. Існуючі тенденції металообробки свідчать, що гнуття заготовок з листового металу широко розповсюджено завдяки високій ефективності використання матеріалу та продуктивності виробництва, що вимагає врахування таких важливих факторів, як властивості матеріалу, пружинення і наявність остаточних напружень, які, в свою чергу, приводять до невідповідності кінцевої геометрії та розмірів профілів відповідно їх креслень та приймально-здавальних характеристик. Було проведено аналіз останніх досліджень і публікацій, що виявив недостачу уваги приділяємої таким важливим питанням як, вибір матеріалу профілів, підсилення профілів за рахунок додаткових конструкційних елементів, та розвиток методики розрахунку напружено-деформованого стану гнутих профілів. Використана методика розрахунку компонентів тензорів та величин залишкових напружень при гнутті листових заготовок, в яку впроваджено математичні моделі деформаційного зміцнення сталей 08кп, 10ХНДП, 3Гпс та 09Г2. Методика враховує не лише модель матеріалу, а й внутрішній радіус гнуття заготовки, що зменшується по технологічним переходам. Використання даної математичної моделі дає значну перевагу у порівнянні із класичними, основаними лише на геометричних параметрах заготовок. В якості прикладу виконано розрахунок та порівняльний аналіз характеристик напружено-деформованого стану при гнутті заготовок з послідовним зменшенням внутрішнього радіусу. Отримані закономірності зміни напружено-деформованого стану у поперечному перерізі, на зовнішньому та внутрішньому радіусах заготовок із врахуванням вказаних матеріалів при гнутті. Показана доцільність використання додаткових конструкційних елементів для підсилення профілів та економії матеріалу.

**Ключові слова:** послідовне гнуття, листова заготовка, зменшення радіусу, деформаційне зміцнення, напруження, залишкові напруження, холодногнутий профіль

**Постановка проблеми.** Останні тенденції у сфері металообробки показують, що гнуття заготовок з листового металу набуло широкого розповсюдження завдяки високій ефективності використання матеріалу та продуктивності виробництва [1, 2]. Зростаючі вимоги до виробів кидають виклик характеристикам та функціональним можливостям як інструменту, так і матеріалу заготовок, що згинають [3, 4]. Неврахування таких важливих факторів, як властивості матеріалу, пружинення і наявність остаточних напружень, приводить до невідповідності кінцевої геометрії та розмірів профілів щодо їх креслень та іншого комплексу приймально-здавальних характеристик. Врахування внутрішнього радіусу гнуття заготовки та деформаційного зміцнення дозволяє спрогнозувати пружинення заготовки після деформації із похибкою у 3 %, що на 8 % успішніше від прогнозування за базовою емпіричною моделлю, що враховувала лише геометричні параметри заготовки [5].

Тому тема дослідження, що спрямована на удосконалення методики розрахунку напруженого стану і залишкових напружень при гнутті листових заготовок із послідовним зменшенням внутрішнього радіусу за рахунок врахування властивостей матеріалів при деформаційному зміцненні є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Роботи присвячені цій темі вивчають ефект пружинення використовуючи як данні власних експериментів, так і данні кінцево-елементного моделювання [6, 7]. Однак у даних роботах недостатньо уваги приділяється впливу різних матеріалів на кінцевий результат дослідження. Проводяться дослідження з пошуку найкращих марок сталей для різних галузей промисловості, але маркам сталей конструкційного призначення та більш доступного сегменту не приділяється увага [2, 8, 9]. Також немає інформації, щодо використання додаткових конструкційних елементів для підсилення профілів, таких як повздовжні рифти. Сучасні експериментальні, чисельні та кінцево-елементні методики розрахунку напружено-деформованого стану листових заготовок при гнутті потребують уточнень [10–12]. Розробка методики для розрахунку напружень при кінцевій формозміні має бути науково-обґрунтована і базуватись на результатах теоретичних розрахунків.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розрахунок за математичною моделлю напружено-деформованого стану і залишкових напружень листових заготовок з різних матеріалів при згинальних операціях зі зменшенням внутрішнього радіусу з перспективою оцінки підсилення профілів за рахунок накатки ребер жорсткості.

**Основний матеріал дослідження.** Було апробовано метод теоретичних досліджень напружено-деформованого стану заготовки при гнутті. Раніше було розроблено математичну модель (1) і (2) процесу гнуття для визначення напружено-деформованого стану у вигляді компонент тензору напружень  $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z$  та залишкових напружень у матеріалі з врахуванням його деформаційного зміцнення [13, 14] ( $\sigma_s$  – опір матеріалу пластичній деформації, МПа). Прийmemo:  $R_H, R_B, r, \rho$  – зовнішній, внутрішній, поточний та нейтральний радіуси при гнутті (рис. 1).

При  $R_H = r \geq \rho$  маємо:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_H}{r} + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 4 + \frac{3}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} + \frac{5}{3\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_\varphi &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 2 \right) + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} + \frac{5}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_z &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 1 \right) + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 2 + \frac{1}{2} R_H R_B \left( 5 \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right]. \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $M$  – момент, що вигинає.

При  $R_H = r \leq \rho$ :

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_B}{r} + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 4 + \frac{3}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} + \frac{5}{3\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_\varphi &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 2 \right) + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} + \frac{5}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_z &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 1 \right) + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 2 + \frac{1}{2} R_H R_B \left( 5 \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

У формулах (1–2) значення  $K$  розраховують як [15, 16]:

$$K = -3 \left( \frac{R_H^3 - R_B^3}{2} \right) \left( \ln \frac{R_H}{R_B} - \frac{1}{2} \right) + \frac{5}{2} R_H R_B \rho \left[ \ln \frac{R_H}{R_B} - \frac{1}{\rho^2} \left( \frac{R_H^2 - R_B^2}{2} \right) \right]. \quad (3)$$

При цьому була використана модель опису зміцнення матеріалу (4), яку було отримано по результатах власних досліджень для сталі 08кп [17]. Також ці данні були порівняні із іншими марками сталей [18], які описують рівняння зміцнення (5)–(7).

$$\text{- 08кп:} \quad \sigma_s = (\sigma_i)_{08kp} = 48,038 \ln(\varepsilon_i) + 601,085; \quad (4)$$

$$\text{- 10ХНДП:} \quad \sigma_{S_2} = (\sigma_i)_{10HNDP} = -3869,2\varepsilon_i^2 + 1777,0\varepsilon_i + 233,14; \quad (5)$$

$$\text{- 3Гпс:} \quad \sigma_{S_3} = (\sigma_i)_{3Gps} = -5527,6\varepsilon_i^2 + 2273,3\varepsilon_i + 262,74 \quad (6)$$

$$\text{- 09Г2:} \quad \sigma_{S_4} = (\sigma_i)_{09G2} = -762,53\varepsilon_i^2 + 673,06\varepsilon_i + 410,86 \quad (7)$$

де  $\varepsilon_i$  – інтенсивність деформацій, що розраховують попередньо [15, 16, 18].

На основі отриманого аналітичного апарату для розрахунку напружено-деформованого стану та залишкових напружень [13, 14] було розроблено програмне забезпечення у системі РТС Mathcad Prime 5.0.0.0. У результаті виконаного розрахунку за схемою (див. рис. 1) та розробленій математичній моделі були отримані данні та побудовані графічні залежності розподілу залишкових напружень у середині заготовки за фіксованого значення внутрішнього ( $R_B = S_0 = 1,4$  мм) радіуса (рис. 2).

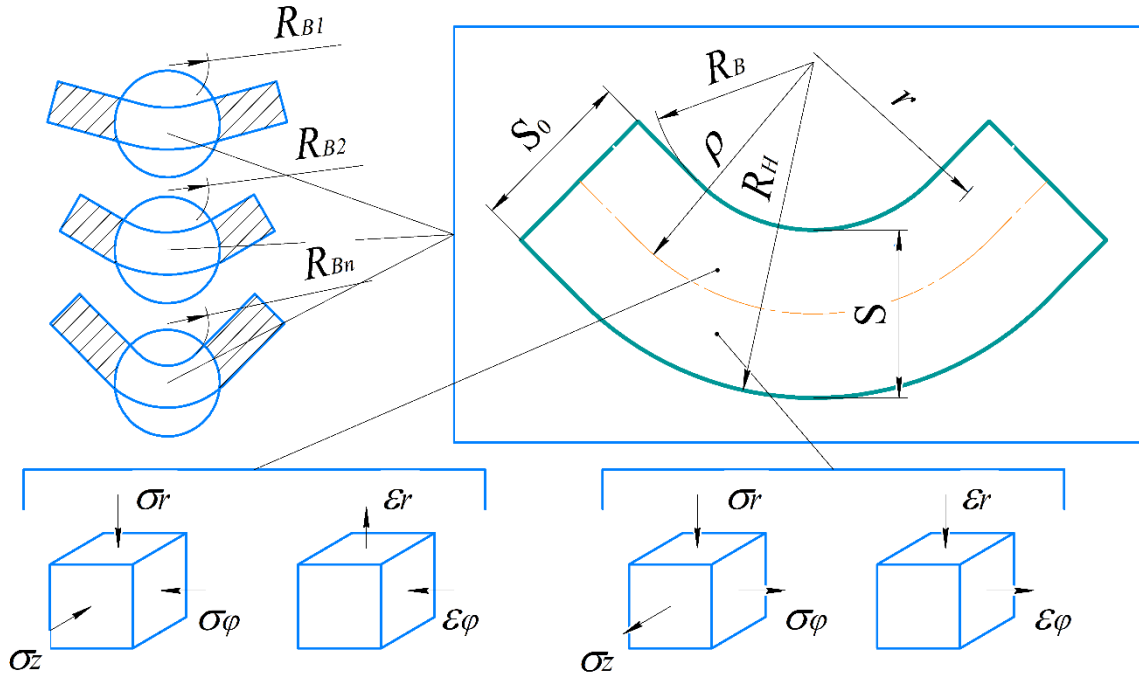
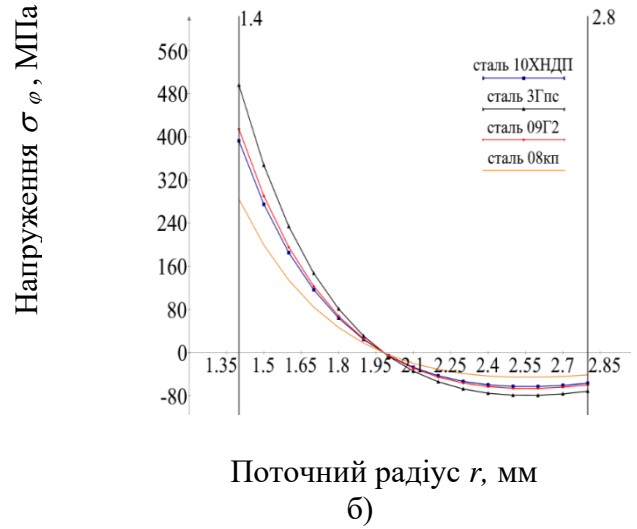
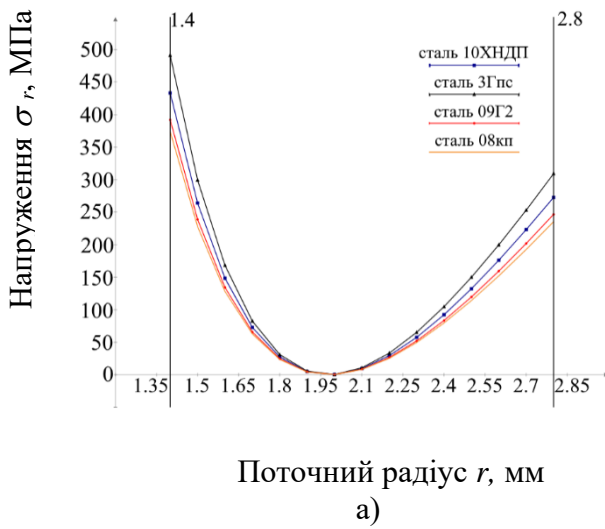


Рисунок 1 – Схема напружено-деформованого стану при гнутті заготовки:  
 $S_0$  та  $S$  – початкова та поточна товщина;  $R_{н}$ ,  $R_{в}$ ,  $r$ ,  $\rho$  – зовнішній, внутрішній,  
 поточний, нейтральний радіуси



## Машинобудування і зварювальне виробництво

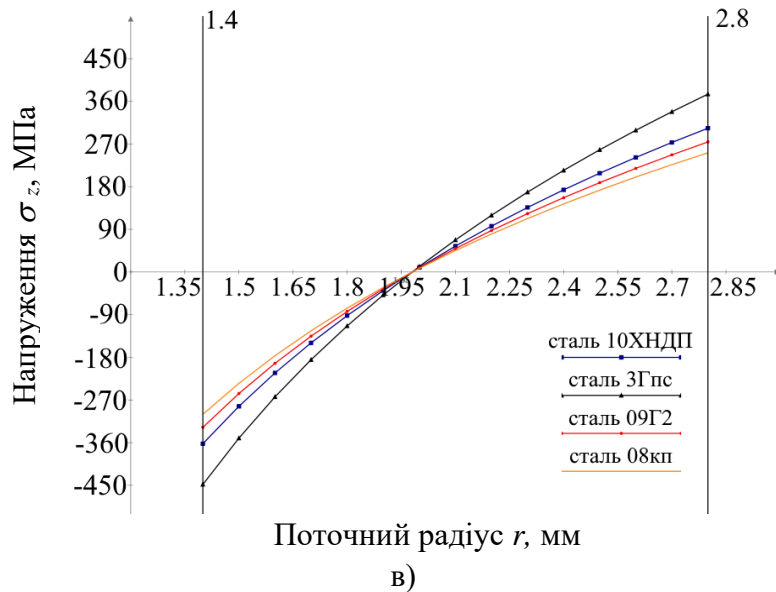
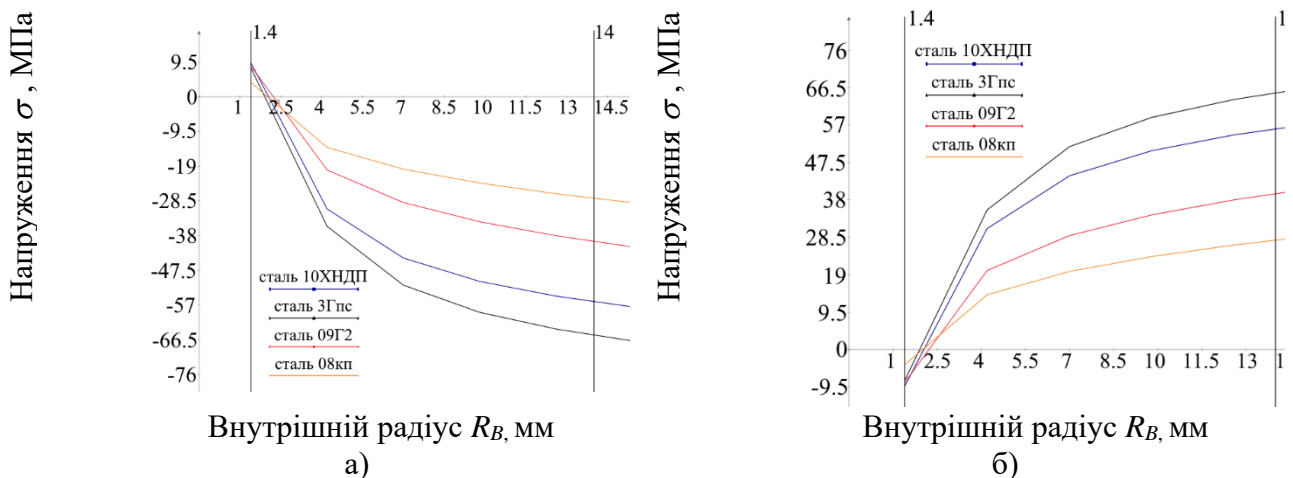


Рисунок 2 – Розподіл напружень у середині заготовки за фіксованого значення внутрішнього радіуса  $R_B = S_0 = 1,4$  мм: а)  $\sigma_r$ ; б)  $\sigma_\varphi$ ; в)  $\sigma_z$ .

Також було проведено розрахунок зміни компонентів тензора напружень для внутрішньої та зовнішньої сторони ділянки, що згинають із зменшенням внутрішнього радіусу  $R_B$  (рис. 3).

Показано, що залишкові напруження мають суттєвий вплив на величину пружинення профілю при знятті навантаження. Показана необхідність врахування кількості переходів, а також значення внутрішнього радіусу заготовки по переходах із врахуванням моделі матеріалу заготовки. З аналізу графіків встановлено, що на внутрішньому шарі заготовки сконцентровані стискаючі напруження, що зменшуються із розподілом напружень по товщині заготовки до зовнішнього радіусу. Характеристики міцності гнутих профілів суттєво залежать від властивостей їх матеріалу, форми калібрів та кількості технологічних проходів.



Машинобудування і зварювальне виробництво

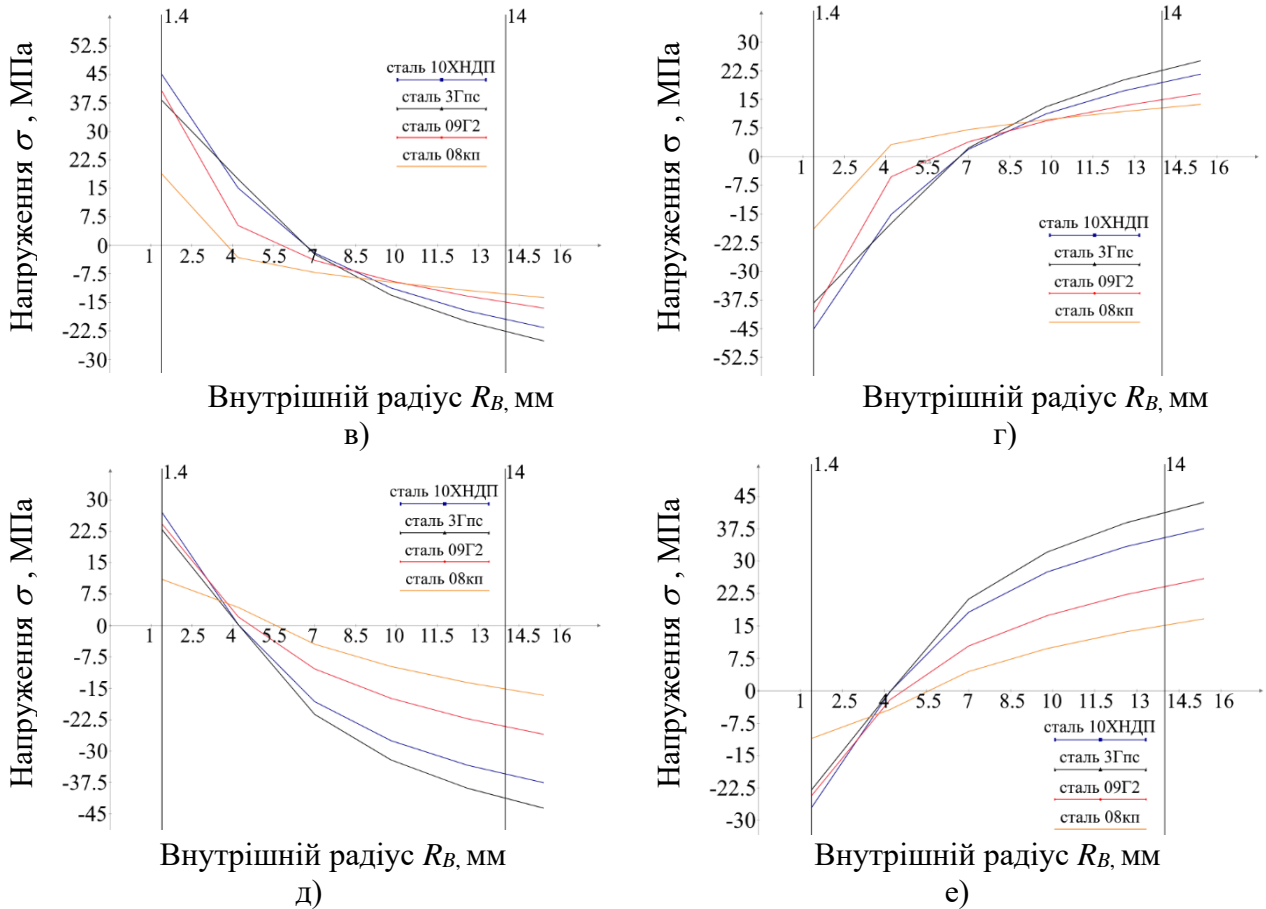


Рисунок 3 – Зміна компонентів тензора напружень для ділянки, що згинають, у залежності від внутрішнього радіусу  $R_B$  та за фіксованого значення  $r = \square$ : а)  $\sigma_r$  внутрішня ділянка; б)  $\sigma_r$  зовнішня ділянка; в)  $\sigma_\phi$  внутрішня ділянка; г)  $\sigma_\phi$  зовнішня ділянка; д)  $\sigma_z$  внутрішня ділянка; е)  $\sigma_z$  зовнішня ділянка.

Встановлено що, серед моделей матеріалів, що були вибрані для розрахунку, показники жорсткості, починаючи із найгіршого і закінчуючи найкращим, розподілились у наступному порядку: сталь марки 08кп, сталь марки 09Г2, сталь марки 3Гпс, сталь марки 10XНДП. Ту ж саму тенденцію можна спостерігати скориставшись будь-яким марочником сталі. Таким чином, у рамках наданого розрахунку найкращі міцнісні характеристики показує сталь марки 10XНДП, а найгірші сталь марки 08кп. Дана тенденція спостерігається у всіх розрахунках, як для напруження у середині заготовки за фіксованого внутрішнього радіуса  $R_B = S_0 = 1,4$  мм, так і для показників компонентів тензора напружень для ділянки, що згинають у залежності від внутрішнього радіусу  $R_B$  та за фіксованого значення  $r = \square$ .

ВИСНОВКИ

Таким чином, методика розрахунку напружено-деформованого стану гнутого профілю при послідовному гнутті заготовки із врахуванням моделі зміцнення матеріалу та зменшення внутрішнього радіусу гнуття дозволяє більш точно прогнозувати деформації та переміщення

у заготовці на стадії проектування технологічної документації. Завдяки врахуванню моделі зміцнення матеріалу та внутрішнього радіуса, що зменшується по технологічних переходах, є змога не лише просто порівняти результати розрахунку у теорії, а й підсилити профіль за рахунок додаткових конструкційних елементів на полицях листових заготовок. Використання таких впроваджень дозволить підвищити міцнісні характеристики із досягненням економії матеріалу.

*Перелік використаних джерел:*

1. Recent development trends in metal forming / Z. Gronostajski, Z. Pater, L. Madej, A. Gontarz, L. Lisiecki, A. Lukaszek-Solek, J. Luksza, S. Mróz, Z. Muskalski, W. Muzykiewicz, M. Pietrzyk, R. E. Sliwa, J. Tomczak, S. Wiewiórowska, G. Winiarski, J. Zasadzinski, S. Ziolkiewicz // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 19. – P. 898–941.
2. Satyanarayana, Gupta M. Design and analysis of aircraft sheet metal for spring back effect / M. Satyanarayana Gupta, D. Ramana Reddy // Materials Today : Proceedings 4. – 2017. – P. 8287–8295.
3. Manufacturing of advanced smart tooling for metal forming / J. Cao, E. Brinksmeier, M. Fu, R. X. Gao, B. Lianga, M. Merklein, M. Schmidt, J. Yanagimoto // CIRP Annals. – 2019. – Vol. 68. – P. 605–628.
4. Нагнибеда, Н. Н. Испытания холодногнутых армирующих профилей открытого типа для определения их прочностных и геометрических характеристик / Н. Н. Нагнибеда, А. О. Крылатов, В. В. Кухарь // Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства : XXIII Міжнар. науково-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених : матеріали конф. (Кременчук, 07–08 квітня 2016 р.) / КрНУ ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2016. – С. 70.
5. Improvement of springback prediction accuracy for Z-section profiles in four-roll bending process considering neutral layer shift / A. Wang, H. Xue, S. Saud, Y. Yang, Y. Weib // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 48. – P. 218–227.
6. Experimental Research of Spring-Back Effect during Sequential Forming with Different Inner Angle, Thickness and Bending Width of Blank / V. Kukhar, M. Nahnibeda, O. Radushev, O. Markov, O. Anishchenko, A. Prysiaznyi // VIII Ukrainian-Polish Scientific Dialogues : Conference Proceeding. International Scientific Conference (Khmelnyskyi; Kamianets-Podilskyi, 16–19 October 2019 y.) / Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2019. – P. 50–52.
7. Julsri, W. Study of springback effect of AHS steels using a microstructure based modeling / W. Julsri, S. Suranuntchai, V. Uthaisangsuk // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 135. – P. 499–516.
8. Investigation on the influence of damage to springback of U-shape HSLA steel plates / H. Dai, H. Jiang, T. Dai, W. Xub, A. Luo // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 708. – P. 575–586.
9. Metal Forming: Specialized Procedures for the Aircraft Industry / W. Koehler, B. Plege, K. F. Sahn, N. Padmapriya // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2017. – 8 p.
10. Experimental and numerical investigations of sheet metal circular bending / P. Viorel, A. S. Saadatou, D. Nedelcu, M. Octavian // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. – 2015. – Vol. 22. – P. 487–496.

11. *Banabic, D.* Sheet Metal Forming Processes, Constitutive Modeling and Numerical Simulation / *D. Banabic.* – Berlin : Springer-Verlag, 2010. – 318 p.
12. Fu, Z. Study on multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal with springback model and FEM simulation / *Z. Fu, J. Mo, W. Zhang* // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology/ – 2009. – Vol. 45. – P. 448–458.
13. *Кухарь, В. В.* Теоретичне дослідження напруженого стану та розрахунок залишкових напружень при гнутті профілів відкритого перерізу / *В. В. Кухарь, М. М. Нагнибеда* // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта : матеріали XVIII Міжнар. науково-техн. конф. (Київ, 29 черв. – 1 лип. 2017 р.). – Київ, 2017. – С. 98–99.
14. *Кухарь, В. В.* Методика розрахунку напружено-деформованого стану листової заготовки при гнутті з урахуванням зміцнення матеріалу / *В. В. Кухарь, О. С. Аніщенко, М. М. Нагнибеда* // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. праць. – Харків, 2017. – Вип. 37 (1259). – С. 36–41. – (Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії)
15. *Алексеев, Ю. Н.* Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / *Ю. Н. Алексеев.* – Харьков : Изд-во ХГУ, 1969. – 107 с.
16. *Ильюшин, А. А.* Механика сплошной среды / *А. А. Ильюшин.* – М. : Изд-во МГУ, 1990. – 285 с.
17. *Кухарь, В. В.* Испытание армирующих профилей и определение их прочностных и геометрических характеристик / *В. В. Кухарь, Н. Н. Нагнибеда* // Проблемы трибологии = Problems of tribology. – 2016. – № 1 (79). – С. 30–35.
18. Методика определения показателя прочности холодногнутого профиля / *Н. Г. Шемшурова, О. В. Ионова, Н. М. Локотушина, Е. М. Седова* // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением : межрегион. сб. науч. тр. / ГОУ ВПО «МГТУ». – Магнитогорск, 2007. – С. 215–219.

**Кухарь В. В., Нагнибеда Н. Н.**

## **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ГИБКЕ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ УМЕНЬШЕНИЕМ ВНУТРЕННЕГО РАДИУСА**

*В работе выполнен краткий обзор методов исследования остаточных напряжений и деформаций при гибке листовых заготовок. Существующие тенденции металлообработки свидетельствуют о том, что гибка заготовок из листового металла широко распространено благодаря высокой эффективности использования материала и производительности производства, что требует учета таких важных факторов, как свойства материала, пружинение и наличие остаточных напряжений, которые, в свою очередь, приводят к несоответствию конечной геометрии и размеров профилей их чертежам и приёмо-сдаточным характеристикам. Был проведен анализ последних исследований и публикаций, который обнаружил недостаток внимания, уделяемого таким важным вопросам как, выбор материала профилей, усиление профилей за счет дополнительных конструктивных элементов, и развитие методики расчета напряженно-деформированного состояния гнутых профилей. Использована методика расчета компонентов тензоров и величин остаточных напряжений при гибке листовых заготовок, в*

которую внедрены математические модели деформационного упрочнения сталей 08кп, 10ХНДП, 3Гпс и 09Г2. Методика учитывает не только модель материала, но и внутренний радиус гибки заготовки, который уменьшается по технологическим переходам. Использование данной математической модели дает значительное преимущество по сравнению с классическими, основанными только на геометрических параметрах заготовок. В качестве примера выполнен расчет и сравнительный анализ характеристик напряженно-деформированного состояния при гибке заготовок с последовательным уменьшением внутреннего радиуса. Получены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении, на внешнем и внутреннем радиусах заготовок с учетом указанных материалов при гибке. Показана целесообразность использования дополнительных конструктивных элементов для усиления профилей и экономии материала.

**Ключевые слова:** последовательное гибки, листовая заготовка, уменьшение радиуса, деформационное упрочнение, напряжение, остаточные напряжения, холодногнутый профиль.

**Kukhar V. V., Nahnibeda M. M.**

### STRESS-DEFORMED STATE OF SHEET BLANK CONSIDERING THE INFLUENCE OF THE MATERIAL PROPERTIES DURING BENDING WITH CONSTANTLY DECREASING INNER RADIUS

*The paper review of methods for the study of residual stresses and strains during bending of sheet blanks. Existing trends in metalworking indicate that bending of sheet metal blanks is widespread due to high material efficiency and production productivity, which requires consideration of such important factors as material properties, springback and the presence of residual stresses, which, in turn, lead to mismatch the final geometry and dimensions of the profiles, their drawings and acceptance characteristics. An analysis of recent studies and publications was carried out, it revealed a lack of attention paid to such important issues as the choice of the material of the profiles, the strengthening of the profiles due to additional structural elements, and the development of the methodology for calculating the stress-strain state of bent profiles. The calculation method of tensor components and values of residual stresses during bending of sheet blanks is used with mathematical models of deformation hardening of steels 08kp, 10HNDP, 3Gps and 09G2. The data of the change of the stress state in the cross section, on the outer and inner radii of the workpieces from the specified materials during bending are obtained. The technique considers not only the material model, but also the inner radius of the workpiece bending, which is reduced by technological transitions. The use of this mathematical model gives a significant advantage over the classical ones based only on the geometric parameters of the blanks. As an example, the calculation and comparative analysis of the characteristics of the stress state during bending of the workpieces with a constantly decreasing inner radius. Regularities of changes in the stress-strain state in the cross section, at the outer and inner radii of the blanks, considering the indicated materials during bending, have been obtained. The expediency of using additional structural elements to strengthen the profiles and save material is shown.*

**Keywords:** multipass bending, sheet blank, radius reduction, deformation hardening, residual stresses, cold-bent shape, springback.

Рекомендовано до публікації: д-р техн. наук, проф. ДВНЗ «ПДТУ» Суглобов В.В.

Стаття надійшла 09.11.2020 р.

УДК 621.91

Потлов В. О., Водзянский В. В.

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ВІЛЬНИМ АБРАЗИВОМ

*У зв'язку з виникненням потреби в очищенні зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей складної конфігурації від задирок, окалини, окислів, бруду, а також обробки цих поверхонь перед фарбуванням і нанесенням різних типів покриття, виникла необхідність в обробній обробці деталей. Відомі методи ручної очистки деталей не дають необхідного якості обробки поверхонь і є мало продуктивними.*

*У статті розглянуті деякі методи обробки деталей вільним абразивом. Обробка ведеться в обертових барабанах що не закріплених, так і закріплених деталей. Ці методи є високо продуктивними і автоматизованими.*

*Цими методами ведеться одночасна обробка великої кількості деталей. Застосовується просте обладнання з нескладної налаштуванням з автоматичним протіканням процесу, а також порівняно не дорога обробляється рідина.*

*У статті розглянуто метод об'ємної вібраційної обробки. Викладено основні переваги та недоліки цього методу. Також розглянуті основні різновиди цього методу.*

*Виконаний аналіз різних методів зачистки деталей після лиття і штампування заготовок методом галтовки в порівнянні вібро-ротаційної обробкою показав, що метод вібро-ротаційної обробкою дає кращі технологічні результати під час його застосування у виробництві.*

*Розглянуто метод відцентрово-ротаційної обробки деталей. Цей метод має високу продуктивність, можливість одночасної обробки заготовок «в навал» великими партіями, можливість переходу від чорнової обробки оздоблювальної обробки шляхом зміни частоти обертання робочої камери без зупинки процесу і можливість механізації і автоматизації допоміжних процесів в циклі обробки.*

*Визначено основні фактори, що впливають на продуктивність і якість обробки: кут швидкості обертання дна; кут нахилу дна; характеристика робочого середовища; фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу; обсяг завантаження робочої камери; співвідношення обсягів оброблюваних заготовок і обробної середовища; час обробки; наявність і властивості технологічної рідини; вихідна шорсткість заготовок і інші фактори.*

***Ключові слова.** Вільний абразив, обертові барабани, об'ємна вібраційна обробка, галтовка, вібро-ротаційна обробка, відцентрово-ротаційної обробки, робоча рідина.*

**Постановка проблеми.** При оздоблювальної обробці або підготовці деталей перед гальванічним покриттям до поверхонь деталей пред'являються жорсткі вимоги по шорсткості поверхні. Ця шорсткість повинна відповідати діапазону Ra = 0,8 - 1,6 мкм. Відомі методи ручної обробки не дозволяють досягти заданої шорсткості і рівномірності обробки по всій поверхні деталі. Ручні методи обробки мають малу продуктивність праці. Тому виникла необхідність механізації і автоматизації даного процесу. Механізація процесу обробки