

Міністерство освіти і науки України  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
Механіко-машинобудівний інститут  
Херсонський національний технічний університет (ХНТУ)  
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України  
Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України  
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України  
ВАТ «Український науково-дослідний інститут авіаційної технології»  
Гомельський державний технічний університет (Республіка Білорусь)  
ТОВ «Інформаційні технології САПР»  
ПП «Содіком-Дніпро»  
Інформаційна підтримка:  
Журнал «Mechanics and Advanced Technologies»

# **МАТЕРІАЛИ**

**ХІ МІЖНАРОДНОЇ  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ  
КОНФЕРЕНЦІЇ**

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ  
ПРОБЛЕМИ В ОБРОБЦІ  
МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ І ЯКОСТІ  
ФАХОВОЇ ОСВІТИ,  
присвяченої 90-річчю кафедри оmt**

**5 – 9 жовтня 2020 р  
Київ, Україна**

УДК 612.7

**Міжнародна науково-технічна конференція "Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти", м. Київ, 6 – 9 жовтня 2020 р.:**  
Матеріали конференції – Київ: 2020.

До збірника матеріалів конференції включено тези представлених доповідей, в яких наведені результати досліджень з ресурсозберігаючих процесів пластичної обробки матеріалів.

Збірник призначений для широкого кола науковців та спеціалістів, працюючих в галузі машинобудування, буде корисним викладачам, аспірантам та студентам технічних вищих навчальних закладів.

## Зміст

### СЕКЦІЯ ТЕОРІЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ПРОЦЕСІВ ПЛАСТИЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

<b>Алієв І.С., Левченко В.М., Корденко М.Ю.</b> РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИМ МЕТОДОМ СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА ВЕРХНЮ НАПІВМАТРИЦЮ ПРИ БОКОВОМУ ВИДАВЛЮВАННІ .....	394
<b>Кухар В.В., Нагнібеда М.М.</b> РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ ГНУТТІ ЗІ ЗМЕНШЕННЯМ ВНУТРІШНЬОГО РАДІУСУ .....	396
<b>Beigelzimer Y., Kulagin R., Davydenko O., Dmitrenko V.</b> QUANTITATIVE DESCRIPTION OF THE MIXING OF METALS UNDER SEVERE PLASTIC DEFORMATION .....	399
<b>Калюжний В.Л., Музика В.А.</b> ГАРЯЧЕ ВИДАВЛЮВАННЯ ІЗ СТАЛІ 20 КОНУСНОГО ВІСЕСИМЕТРИЧНОГО ПОРОЖНИСТОГО НАПІВФАБРИКАТУ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ВИТЯГУВАННЯ З ПОТОНШЕННЯМ .....	402
<b>Пузир Р.Г., Левченко Р.В., Аргат Р.Г., Сіра Ю.Б., Пузир В.Р., Дятловська В.Л.</b> МОДЕЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛУ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЗАГОТОВКИ ЗІ ЗВАРНИМ ШВОМ ПРИ ОБТИСКУ-РОЗДАЧІ .....	406
<b>Плеснецов Ю.А., Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ .....	408
<b>Кулік Т. О.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОЇ ПРОКАТКИ ВІДНОСНО ТОНКИХ СМУГ НА ПОХІДНЕ ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ПРОКАТУ .....	411
<b>Karnaikh S.G.</b> RESEARCH OF THE INFLUENCE OF DEFORMATION SPEED ON ENERGY AND POWER ADJECTIVES OF THE PROCESS OF THREE-POINT COLD BEND BREAKING .....	413

УДК 621.981.1

## РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ ГНУТТІ ЗІ ЗМЕНШЕННЯМ ВНУТРІШНЬОГО РАДІУСУ

**Кухар В.В., Нагнібеда М.М.**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

До теперішнього часу немає перевіреної і впровадженої методики для розрахунку напружено-деформованого стану матеріалу та залишкових напружень при гнутті профілів. Розробка методики для розрахунку напружень при кінцевій формозміні має бути науково-обґрунтована і базуватись на результатах теоретичних розрахунків. Неврахування таких важливих факторів, як властивості матеріалу, пружинення та наявність остаточних напружень приводить до невідповідності кінцевих розмірів профілів потрібної конфігурації і дефектоутворення у міжвалковому просторі профілезгинальних станів.

Тому тема роботи, що спрямована на розвиток методики розрахунку напруженого стану і залишкових напружень з врахуванням зміни внутрішнього радіусу при гнутті профілів є актуальною.

Метою роботи є розрахунок за математичною моделлю напружено-деформованого стану і залишкових напружень листової заготовки при згинальних операціях зі зменшенням внутрішнього радіусу з перспективою підсилення профілів за рахунок накатки ребер жорсткості (повздовжніх рифтів). Було апробовано метод теоретичних досліджень для напружено-деформованого стану у заготовці 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 [1, 2] ( $\sigma^S$  – 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:

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

 При  $R_H = r \leq \rho$ :

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

При цьому була використана модель опису зміцнення матеріалу (3), яку було отримано по результатах власних досліджень для сталі 08кп [3].

$$\sigma_S = (\sigma_i)_{08кп} = 48,038 \ln(\varepsilon_i) + 601,085, \quad (3)$$

де  $\varepsilon_i$  – інтенсивність деформацій, що розраховують попередньо [2–3].

Показано, що залишкові напруження мають суттєвий вплив на величину пружинення профілю при знятті навантаження та показана необхідність врахування кількості переходів, а саме значення кута між полицями профілю або внутрішнього радіусу заготовки по переходах. На основі триманого аналітичного апарату для розрахунку напружено-деформованого стану та залишкових напружень [1, 2] було розроблено програмне забезпечення у системі PTC Mathcad Prime 5.0.0.0.

У результаті виконаного розрахунку за схемою (рис. 1) та розробленій математичній моделі були отримані дані та побудовані графічні залежності зміни компонентів тензора напружень для внутрішньої та зовнішньої сторони ділянки, що згинають із зменшенням внутрішнього радіусу  $R_B$  (рис. 2).

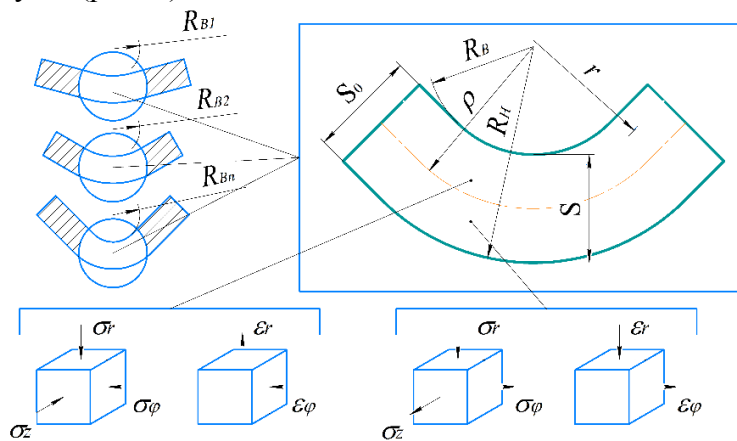


Рис. 1. Схема напружено-деформованого стану при гнутті заготовки;  $S_0$  – початкова товщина заготовки;  $S$  – поточна товщина;  $r$  – поточний радіус;

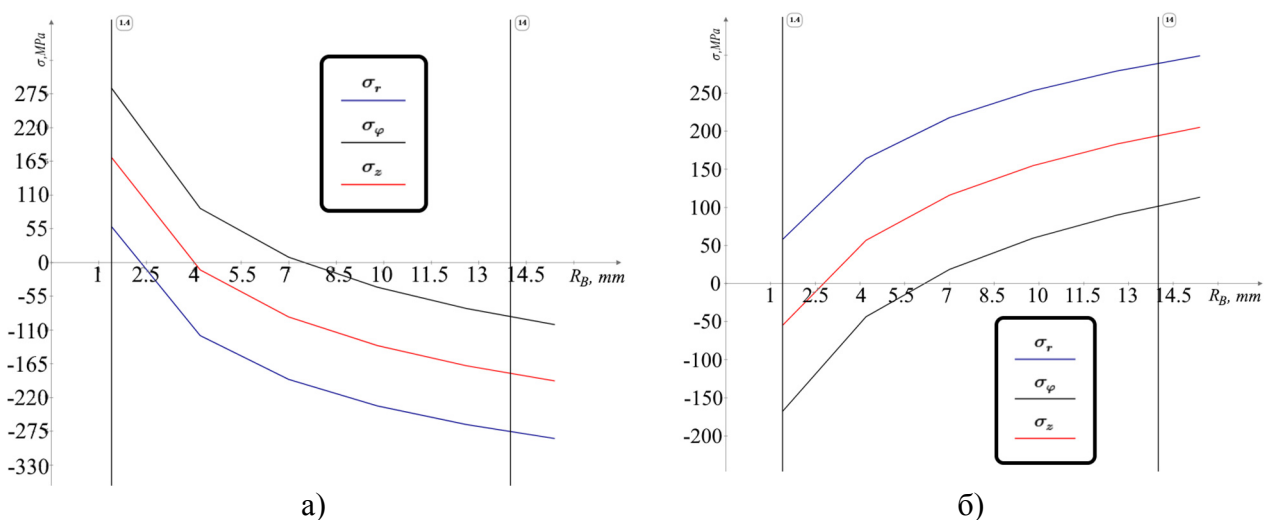


Рис. 2. Зміна компонентів тензора напружень для внутрішньої та зовнішньої сторони ділянки, що згинають у залежності від внутрішнього радіусу  $R_B$  та за фіксованого значення  $r = \rho$ : а) внутрішня ділянка; б) – зовнішня ділянка.

Також було проведено розрахунок розподілу залишкових напружень у середині заготовки за фіксованого значення внутрішнього ( $R_B = S_0 = 1.4$  мм) радіуса (рис. 3).

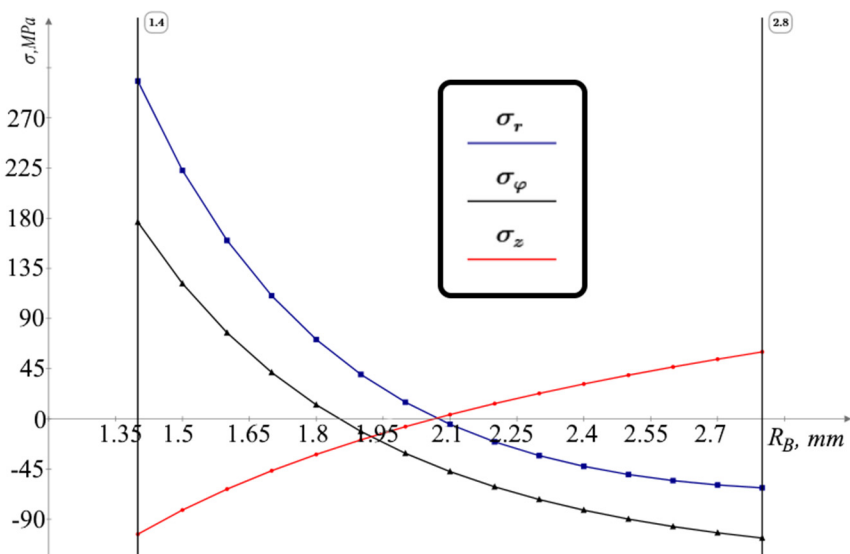


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень у середині заготовки за фіксованого значення внутрішнього радіуса ( $R_B = S_0 = 1.4$  мм).

З аналізу графіків встановлено, що на внутрішньому шарі заготовки сконцентровані стискаючі напруження, що зменшуються із розподілом напружень по товщині заготовки до зовнішнього радіусу. Міцнісні характеристики гнутих профілів суттєво залежать від властивостей їх матеріалу, форми калібрів та кількості технологічних проходів.

**ВИСНОВКИ** Таким чином, методика розрахунку напружено-деформованого стану гнутого профілю при послідовному гнутті заготовки зі зменшенням внутрішнього радіусу гнуття дозволяє прогнозувати деформації та переміщення у заготовці на стадії проектування технологічної документації. Завдяки врахуванню внутрішнього радіусу, що зменшується по технологічних проходах, є змога підсилити профіль за рахунок додаткових конструкційних елементів на полицях листових заготовок. Використання таких впроваджень дозволить підвищити міцнісні характеристики із досягненням економії матеріалу.

#### Список використаних джерел

1. Кухарь В. В. Теоретичне дослідження напруженого стану та розрахунок залишкових напружень при гнутті профілів відкритого перерізу / В. В. Кухарь, М. М. Нагнібеда // Матеріали XVIII Міжнародної науково-технічної конференції (МНТК) «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2017. – Київ : НТУУ «КПІ», 2017. – С. 98–99.
2. Кухарь В. В. Методика розрахунку напружено-деформованого стану листової заготовки при гнутті з урахуванням зміцнення матеріалу / В. В. Кухарь, О. С. Аніщенко, М. М. Нагнібеда // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. праць. Харків, 2017. Вип. 37 (1259). С. 36–40.
3. Кухарь В. В. Испытание армирующих профилей и определение их прочностных и геометрических характеристик / В. В. Кухарь, Н. Н. Нагнібеда // Проблемы трибологии = Problems of tribology. – Хмельницький ХНУ. – 2016. – №1(79). – С. 30–35.