

УДК 66.045 : 621.981

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup2.11

А. В. НОВОШИЦЬКИЙ, С. Ж. БОДУ, Д. В. ФАБРИЦІЄВ

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЗДОВЖНЬОГО РОЗТЯГУ
НА ПРУЖИНЕННЯ СМУГИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ЗГИНІ**

*Предметом дослідження є процес поперечного згину тонкостінної смуги при одночасній дії поздовжнього розтягу та закономірності впливу поздовжніх напружень на величину пружинення після розвантаження. Дослідження є продовженням теоретичних робіт, присвячених профілюванню з поздовжнім розтягом і розв'язанню задачі жорсткопластичного згину смуги. **Мета роботи** – експериментальна перевірка теоретичних положень щодо впливу поздовжнього розтягу на пружинення смуги при поперечному згині та встановлення залежності між рівнем поздовжніх напружень і параметрами пружного відновлення. **Завдання** – розробити методику експериментального дослідження, створити спеціальне випробувальне пристосування, визначити механічні характеристики матеріалів дослідних зразків, провести випробування при різних рівнях поздовжніх напружень і встановити залежності залишкового прогину та відносного пружинення від величини поздовжнього розтягу. **Методи**. Використано експериментальні методи дослідження процесу пластичного деформування при поперечному згині з поздовжнім розтягом. Випробування проведено на спеціально розробленому пристосуванні, встановленому в універсальній випробувальній машині. Дослідження виконано на плоских зразках із жароміцних корозійностійких сплавів X18H9T товщиною 0,18 мм і XH78T товщиною 0,30 мм. Результати оброблено методами математичної статистики та аналізу похибок вимірювань. **Результати**. Розроблено методику експериментального дослідження та спеціальне пристосування для випробувань при заданому рівні поздовжніх напружень. Отримано залежності залишкового прогину та відносного пружинення від величини поздовжніх напружень. Встановлено, що зі збільшенням поздовжніх напружень залишковий прогин зростає, а пружинення після розвантаження зменшується, що підтверджує ефективність використання поздовжнього розтягу для підвищення точності формоутворення тонкостінних профілів. **Висновки**. Запропонована методика випробувань і експериментальне оснащення забезпечують достовірне визначення параметрів пружинення та можуть використовуватися для дослідження процесів профілювання тонкостінних виробів. **Наукова новизна**. Експериментально підтверджено встановлені теоретичним шляхом закономірності впливу поздовжнього розтягу на величину пружинення смуги при поперечному згині та отримано кількісні залежності залишкового прогину та відносного пружинення від рівня поздовжніх напружень, зокрема для жароміцних корозійностійких сплавів.*

Ключові слова: гнуття з поздовжнім розтягом; поперечний згин; пружинення; тонкостінна смуга; експериментальне дослідження; залишкова кривизна; технологічне оснащення; теплообмінні апарати.

Вступ

Тонкостінні профілювані елементи широко застосовуються в теплообмінних апаратах, авіаційній, енергетичній та суднобудівній галузях. До таких деталей висуваються підвищені вимоги щодо точності геометричних параметрів, стабільності форми та мінімізації пружинення після формоутворення. Використання традиційних технологій штампування для виготовлення виробів із високоміцних і корозійностійких матеріалів супроводжується значними енергетичними витратами, необхідністю застосування потужного пресового обладнання та труднощами забезпечення необхідної точності готових виробів.

Перспективною альтернативою є технологія профілювання локальним силовим впливом із поздовжнім розтягом заготовки [1, 2, 3], яка забезпечує послідовне формоутворення профілю при одночас-

ному прикладанні осьового навантаження. Використання поздовжнього розтягу дозволяє зменшити згинальний момент, запобігти виникненню хвилястості кромок і скручування, а також істотно знизити величину пружинення після деформування.

У попередніх дослідженнях [4] авторами було наведено рішення задачі жорсткопластичного згину смуги з поздовжнім розтягом, визначено закономірності зміни напружено-деформованого стану матеріалу, отримано аналітичні залежності для розрахунку згинального моменту, залишкової кривизни та пружинення, а також запропоновано інженерну методику визначення параметрів технологічного процесу профілювання. Теоретичні результати стали основою для методики розрахунку параметрів технологічного оснащення та її програмної реалізації.

Разом із тим, ефективність запропонованого рішення та можливість його практичного викорис-



тання потребують експериментального підтвердження. Достатній інтерес становить дослідження впливу поздовжніх напружень розтягу на величину пружинення після поперечного згину, оскільки цей фактор значною мірою визначає точність формоутворення тонкостінних профілів і якість готових виробів.

Метою роботи є експериментальна перевірка теоретичних положень щодо впливу поздовжнього розтягу на пружинення смуги при поперечному згині шляхом проведення випробувань на спеціально розробленому експериментальному пристосуванні та встановлення залежності між пружиненням і величиною поздовжніх напружень розтягу.

Постановка задачі дослідження

Об'єктом досліджень є процес поперечного згинання стрічки при дії на неї поздовжнього навантаження розтягу.

Метою досліджень є перевірка теоретично отриманих припущень щодо можливості зменшення пружинення стрічки, яка деформувалась згинанням у поперечному напрямку при дії на неї поздовжнім навантаженням розтягу.

Дослідження здійснено за допомогою спеціального пристосування, яке встановлювалось в універсальну випробувальну машину.

Експериментальний зразок стрічки піддавався поперечному згинанню при дії на нього поздовжнього навантаження розтягу. Після зняття навантаження та виймання зразка з пристосування вимірювався його залишковий поперечний прогин.

Встановлювалась залежність залишкових прогинів та залежність відносного пружинення зразків від поздовжніх напружень розтягу.

Аналіз закономірностей згину стрічки проведено у відносних безрозмірних величинах, $\tilde{\sigma}_Z = \sigma_Z / \sigma_T$ – відносні напруження розтягу, де σ_Z – напруження від розтягу, σ_T – границя текучості матеріалу стрічки; $\Delta\tilde{\phi} = \tilde{\phi}_T - \tilde{\phi}_0$ – відносне пружинення, де $\tilde{\phi}_T$ – відносна кривизна зразків при згині, $\tilde{\phi}_0$ – залишкова відносна кривизна.

При деформуванні зразків напруження розтягу задавалися від 0 до σ_T , тобто $\tilde{\sigma}_Z$ знаходилися в діапазоні від 0 (деформування без поздовжнього розтягу) до 1 (деформування, коли напруження від поздовжнього розтягу дорівнюють границю текучості $\tilde{\sigma}_Z = \sigma_T$).

Результати

При проведенні випробувань використовувалися плоскі зразки (рис. 1), які виготовлялися з високоле-

гованих жароміцних нержавіючих сплавів X18H9T та XH78T, товщинами 0,18 мм та 0,30 мм відповідно.

Заготовки зразків вирізалися з рулонного прокату вздовж напрямку прокатування, що відповідає умовам виготовлення тонкостінних профілів зі смуги, одержаної шляхом поздовжнього розрізання рулону.

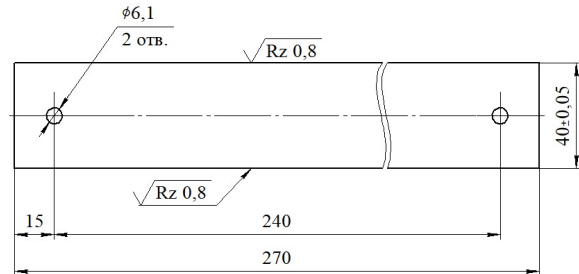


Рис. 1. Експериментальний зразок

Для отримання зразків однакових розмірів заготовки комплектувалися в пакети по 30...50 штук, які стискалися двома жорсткими сталевими пластинами. Після цього виконувалася механічна обробка торців пакетів фрезеруванням і шліфуванням, а також свердлилися отвори на кінцях зразків.

Аналогічним способом виготовлялися плоскі стандартні десятикратні зразки для визначення механічних характеристик матеріалу та побудови діаграми розтягу.

Випробування зразків на розтяг проводилися відповідно до [5]. Визначені за результатами випробувань стандартних зразків основні механічні характеристики зразків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Механічні характеристики зразків

Матеріал зразку	Товщина	Границя текучості	Границя міцності
	H, мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа
X18H9T	0,18	284	556
XH78T	0,30	362	611

Для проведення випробувань було спроектовано та виготовлено спеціальне пристосування, призначене для випробування зразків при згині з попереднім поздовжнім розтягом із використанням універсальної випробувальної машини FP-10/1 (Німеччина).

Універсальна випробувальна машина дозволила з достатньою точністю задавати зусилля попереднього розтягу зразків, створювати однакову швидкість розтягу під час визначення механічних характеристик матеріалу зразків і їх деформуванні в спеціальному пристосуванні.

Пристосування забезпечувало можливість одночасного випробування двох зразків. Це виключало можливість ексцентричного навантаження, а також скорочувало тривалість проведення випробувань.

Конструктивну схему пристосування наведено на рис. 2.

Під час випробувань зразки 1 встановлювалися між циліндричною оправкою 10, яка виконувала функцію пуансона, та двома масивними притискачами 8, що виконували функцію матриць.

Захвати, призначені для деформування кінцевих ділянок зразків та їх затискання, утворювалися наконечниками 6 і притискними планками 7. Необхідне зусилля притискання зразків 1 створювалося затягуванням гвинтів 5.

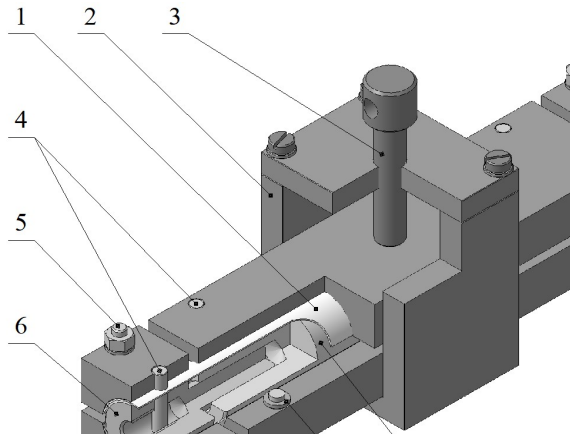


Рис. 2. Пристосування для випробувань зразків:
1 – зразок; 2 – рамка силова; 3 – гвинт силовий;
4 – штифти; 5 – гвинт; 6 – наконечник;
7 – планка притискна; 8 – притискачі;
9 – шайба обмежувальна; 10 – оправка

В оправці з обох боків виконано напрямні отвори, до яких входять центрувальні виступи наконечників 6. У наконечниках передбачено глухі різьбові отвори для кріплення до траверс розтяжної машини.

Точність взаємного розташування наконечників, притискних планок, зразків і притискачів забезпечувалася циліндричними штифтами 4. Штифти, розташовані в кінцевих захватах, виключали можливість прослизання зразків під час прикладання розтягувального навантаження.

Силовa рамка 2 із силовим гвинтом 3, закріплена на одному з притискачів, забезпечувала під час обертання силового гвинта створення необхідного зусилля для обтиснення зразків навколо оправки.

Для запобігання виникненню недопустимих контактних напружень у місцях контакту зразків із робочими поверхнями оправки та притискачів граничне переміщення притискачів обмежувалося металевими обмежувальними шайбами 9. Шайби підбиралися відповідної товщини залежно від товщини зразків і встановлювалися на напрямних штифтах. Крім того, між зразками та притискачами в окремих випадках установлювалися фторопластові прокладки.

Під час проведення випробувань зразки 1 укладалися між оправкою 10 і приєднаними до неї наконечниками 6. За допомогою притискних планок 7 і штифтів 4 здійснювали деформування та затискання кінцевих ділянок зразків шляхом затягування гвинтів 5. Після цього встановлювалися притискачі 8. Взаємне розташування притискачів забезпечувалося штифтами 4.

Підготовлене до випробувань пристосування разом із зразками за допомогою різьбових отворів наконечників нагвинчувалося на шпильки, закріплені на рухомій і нерухомій траверсах універсальної випробувальної машини FP-10/1 (рис. 3).

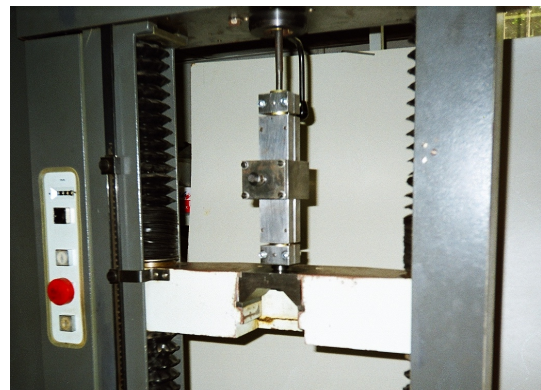


Рис. 3. Встановлення пристосування у випробувальній машині FP-10/1

Під час переміщення рухомої траверси випробувальної машини зі швидкістю 1 мм/хв створювалося необхідна розтягувальна сила відповідно до заданих напружень розтягу. Після цього зразки згиналися шляхом обертання силового гвинта та зближення притискачів з оправкою. Переміщення притискачів обмежувалося шайбами.

Деформацію зразка під час випробувань показано на рис. 4. Зразок згинався по оправці радіусом $R_{\text{опр}} = 14,4$ мм під дією різних поздовжніх напружень σ_z . На рисунку позначено: R_r – радіус гнуття зразка; R_0 – залишковий радіус згину зразка.

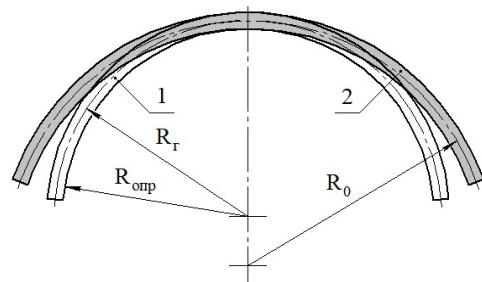


Рис. 4. Деформація зразка при випробуванні
1 – деформований зразок; 2 – розвантажений зразок

Величини залишкових радіусів кривизни визначалися за значеннями залишкового прогину. Залишковий прогин деформованого зразка вимірювався посередині та в двох перерізах, розташованих на відстані 30 мм від середини зразка, за допомогою спеціального пристосування (рис. 5).

Пристосування для визначення залишкового прогину зразка 1 складається з призми 2 та індикатора годинникового типу 3 із ціною поділки 0,01 мм.

Вимірювання залишкового прогину f зразка виконувалося на базі $b = 20$ мм.

Кожне значення залишкового прогину отримано за результатами серії дослідів семи пар зразків.

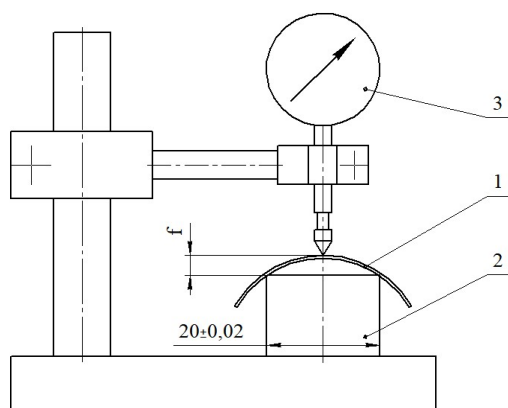


Рис. 5. Схема вимірювання залишкового прогину зразка

Статистичну обробку результатів випробувань зразків виконували відповідно до рекомендацій [6, 7].

За результатами випробувань отримано залежності залишкового прогину зразків від величини поздовжніх напружень розтягу.

Експериментальні значення прогинів зразків наведено на рис. 6.

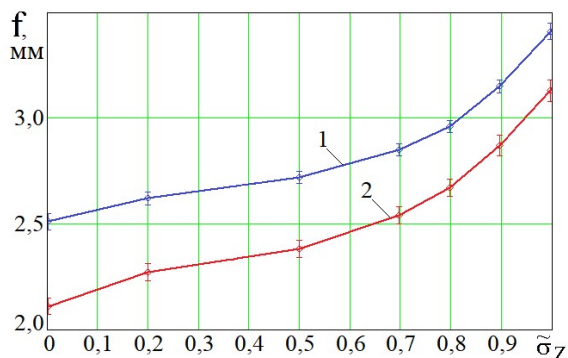


Рис. 6. Залежності залишкових прогинів зразків від величини осьових напружень розтягу:
1 – X18N9T, $H = 0,18$ мм; 2 – XH78T, $H = 0,30$ мм

Параметри згину зразків для кожної серії дослідів визначалися в такій послідовності:

1. Відносна кривизна зразків при згині

$$\tilde{\phi}_r = \frac{R_{\text{пруж}}}{R_r},$$

де $R_{\text{пруж}} = \frac{H E}{2 \sigma_T}$ – найбільший радіус пружного згину зразка,

$$R_r = R_{\text{опр}} + \frac{H}{2} \text{ – радіус гнуття зразка,}$$

E – модуль пружності матеріалу стрічки.

2. Залишкова відносна кривизна

$$\tilde{\phi}_0 = \frac{R_{\text{пруж}}}{R_0},$$

де R_0 – залишковий радіус кривизни зразка, який визначався за експериментальним значенням прогину f при відповідних значеннях $\tilde{\sigma}_Z$ параметрів за наведеною формулою

$$R_0 = \frac{b^2}{8f} + \frac{f}{2}.$$

3. Величина відносного пружинення після розвантаження зразка

$$\Delta \tilde{\phi} = \frac{R_{\text{пруж}}}{R_r} - \frac{R_{\text{пруж}}}{R_0} = \tilde{\phi}_r - \tilde{\phi}_0.$$

Таким чином, за результатами експериментальних випробувань визначено залежність відносного пружинення від величини відносних поздовжніх напружень розтягу для зразків з різних матеріалів (рис. 7).

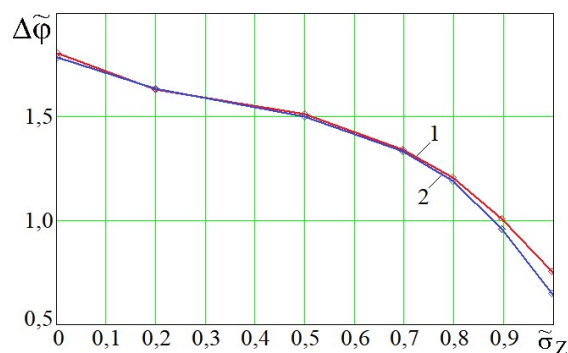


Рис. 7. Залежності відносного пружинення від величини осьових напружень розтягу:
1 – X18N9T, $H = 0,18$ мм; 2 – XH78T, $H = 0,30$ мм

Висновки

1. Розроблено методику експериментального дослідження процесу поперечного згину смуги з поздовжнім розтягом, яка забезпечує визначення

величини залишкового прогину, залишкової кривизни та пружинення після розвантаження.

2. Для проведення випробувань спроектовано та виготовлено спеціальне пристосування, що дає змогу виконувати згинання плоских зразків при заданому рівні поздовжніх напружень розтягу.

3. Експериментально встановлено, що зі збільшенням поздовжніх напружень розтягу відбувається збільшення залишкового прогину зразків і зменшується інтенсивність пружинення після поперечного згину, що свідчить про підвищення ефективності процесу формоутворення при використанні поздовжнього розтягу.

4. Отримані результати підтверджують доцільність застосування поздовжнього розтягу як ефективного технологічного засобу зменшення пружинення під час профілювання тонкостінних деталей, у тому числі з корозійностійких сталей.

Внесок авторів: формулювання проблеми, організація роботи колективу – **А. В. Новошицький**; огляд і аналіз інформаційних джерел – **С. Ж. Боду, Д. В. Фабріцієв**; розробка конструкції пристосування – **А. В. Новошицький, С. Ж. Боду**; проведення та аналіз результатів досліджень – **А. В. Новошицький, Д. В. Фабріцієв**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Новошицький, А. В. *Технология изготовления тонкостенных гнутых элементов теплообменных аппаратов ГТУ гибкой с продольным растяжением* / А. В. Новошицкий // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2009. – № 4/5 (40). –

С. 42–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2009.21829>

2. *Спосіб виготовлення гнутих профілів* : Пат. UA 44451 Україна : B21D5/00, B21D53/00 / С. М. Соловійов, А. В. Новошицький. – № 2001031674 ; заявл. 12.03.2001 ; опубл. 15.02.2002. – Бюл. № 2. – 4 с.

3. *Розтяжна машина* / Пат. UA 43149 Україна : B21D5/00, B21D11/20 / С. М. Соловійов, А. В. Новошицький. – № 2001031675 ; заявл. 12.03.2001 ; опубл. 15.11.2001. – Бюл. № 10. – 6 с.

4. *Розрахунок параметрів технології профілювання з поздовжнім розтягом тонкостінних деталей теплообмінних апаратів* / А. В. Новошицький, С. Ж. Боду, Д. В. Фабріцієв та ін. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2025. – № 4, спецвип. 2 (206). – С. 132–139. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.4sup2.15>

5. *ДСТУ ISO 6892-1:2019. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Ч. 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT)*. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 60 с.

6. *Статистичний аналіз даних вимірювань : навч. посіб.* / В. С. Єременко, Ю. В. Куц, В. М. Мокийчук, О. В. Самойліченко. – Київ : Освіта України, 2017. – 320 с.

7. *Handbook of Mathematics* / I. N. Bronshtein, K. A. Semendyayev, G. Musiol, H. Mühlig. – 6th ed. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2015. – 1207 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46221-8>

References

1. Novoshytskyi, A. V. *Tehnologija izgotovleniya tonkostennykh gnutykh jelementov teploobmennyyh apparatov GTU gibkoj s prodol'nym rastjazheniem* [Technology of manufacturing thin-walled bent elements of heat exchangers of gas turbines by flexible longitudinal stretching]. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий - Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2009, no. 4/5 (40), pp. 42–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2009.21829>

2. Solovyov, S. M., Novoshytskyi, A. V. *Sposib vyhotovlennya hnutykh profiliv* [Method for manufacturing bent profiles]. Patent UA 44451 A, 2002.

3. Solovyov, S. M., Novoshytskyi, A. V. *Roztyazhna mashyna* [Stretching machine]. Patent UA 43149 A, 2001.

4. Novoshytskyi, A. V., Bodu, S. J., Fabritsiev, D. V., Shumilov, A. P., Nikolaev, A. L. *Rozrakhunok parametriv tekhnologii profiluvannia z pozdovzhnim roztiatom tonkostinnykh detalei teploobminnykh aparativ* [Calculation of parameters of profiling technology with longitudinal tension of thin-walled parts of heat exchangers]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace Technic and Technology*, 2025, no. 4 sup 2 (206), pp. 132–139. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.4sup2.15>

5. *DSTU ISO 6892-1:2019. Metalevi materialy. Vyprobuvannia na roztiakh. Chastyna 1. Metod vypro-*

buvannya za kimnatnoi temperatury [Method of test at room temperature] (ISO 6892-1:2016, IDT). Kyiv : DP «UkrND-NTs», 2020. 60 p.

6. Yermenko V. S., Kuts Yu. V., Mokiichuk V. M., Samoilichenko O. V. *Statystychnyi analiz danykh*

vymiriuvan [Statistical Analysis of Measurement Data]. Kyiv: Osvita Ukrainy, 2017. 320 p.

7. Bronshtein I. N., Semendyayev K. A., Musiol G., Mühlig H. *Handbook of Mathematics*. 6th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. 1207 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46221-8>

Надійшла до редакції 15.07.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 06.08.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 04.09.2026

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF LONGITUDINAL TENSION ON THE SPRINGBACK OF A STRIP DURING TRANSVERSE BENDING

Anton Novoshytskyi, Svitlana Bodu, Dmytro Fabritsyiev

The subject of the study is the process of transverse bending of a thin-walled strip under the simultaneous action of longitudinal tension and the regularity of the influence of longitudinal stresses on the magnitude of springback after unloading. The study is a continuation of theoretical works devoted to profiling with longitudinal tension and solving the problem of rigid-plastic bending of a strip. The purpose of the work is to experimentally verify the theoretical provisions regarding the influence of longitudinal tension on the springback of a strip during transverse bending and to establish the dependence between the level of longitudinal stresses and the parameters of elastic recovery. The task is to develop a methodology for experimental research, create a special test fixture, determine the mechanical characteristics of the materials of the test specimens, conduct tests at different levels of longitudinal stresses and establish the dependence of the residual deflection and relative springback on the magnitude of longitudinal tension. Methods. Experimental methods were used to study the process of plastic deformation during transverse bending with longitudinal tension. The test was carried out on a specially designed device installed in a universal testing machine. The study was performed on flat samples of heat-resistant corrosion-resistant alloys Kh18N9T with a thickness of 0.18 mm and KhN78T with a thickness of 0.30 mm. The results were processed using methods of mathematical statistics and measurement error analysis. Results. A methodology for experimental research and a special device for testing at a given level of longitudinal stresses were developed. The dependences of residual deflection and relative springback on the magnitude of longitudinal stresses were obtained. It was found that with increasing longitudinal stresses, the residual deflection increases, and the springback after unloading decreases, which confirms the effectiveness of using longitudinal tension to increase the accuracy of shaping thin-walled profiles. Conclusions. The proposed test method and experimental equipment provide reliable determination of springback parameters and can be used to study the processes of profiling thin-walled products. Scientific novelty. The theoretically established regularities of the influence of longitudinal tension on the magnitude of the springback of the strip during transverse bending were experimentally confirmed and the quantitative dependences of the residual deflection and relative springback on the level of longitudinal stresses were obtained, in particular for heat-resistant corrosion-resistant alloys.

Keywords: bending with longitudinal tension; transverse bending; springback; thin-walled strip; experimental study; residual curvature; manufacturing tooling; heat exchangers.

Новошицький Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Боду Світлана Жаківна – доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Фабріцієв Дмитро Віталійович – аспірант кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Anton Novoshytskyi – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: anton.novoshytskyi@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3232-4718.

Svitlana Bodu – Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: svitlana.bodu@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1932-0955.

Dmytro Fabritsyiev – Postgraduate Student of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: dmytro.fabritsyiev@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5810-2783.