

таллургии железа : учебник / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, В.С. Моркун, Е.В. Чупринов, Д.А. Кассим. – Кривой Рог : Издатель Чернявский Д.А., 2020. – 663 с.

3. Дурнов В.К. Воздушная классификация агломерата и окатышей / В.К. Дурнов, Н.М. Бабушкин, А.М. Штейнберг // Сталь. – 1981. – № 5. – С. 6-8.

#### References:

1. Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo oksislennykh okatyshej. Tekhnologiya. Oborudovanie* [Production of oxidized pellets. Technology. Equipment]. Ekaterinburg, Marat Publ., 2004. 280 p. (Rus.)
2. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Morkun V.S., Chuprinov E.V., Kassim D.A. *Teoriya i tekhnologiya podgotovki shikhtovykh materialov dlya domennoy i bezdomennoy metallurgii zheleza: uchebnik* [Theory and technology of preparation of charge materials for blast-furnace and blast-furnace metallurgy of iron: textbook]. Krivoy Rog, Izdatel Chernyavskiy D.A. Publ., 2020. 663 p. (Rus.)
3. Durnov V.K., Babushkin N.M., Shtejnberg A.M. *Vozdushnaya klassifikaciya aglomerata i okatyshej* [Air classification of sinter and pellets]. *Stal' – Steel*, 1981, no. 5, pp. 6-8. (Rus.)

Рецензент: О.Д. Учитель  
д-р техн. наук, проф. ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.04.2021

УДК 739.4

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240578

© Аніщенко О.С.<sup>1</sup>, Гущин А.В.<sup>2</sup>, Кухар В.В.<sup>3</sup>, Присяжний А.Г.<sup>4</sup>

### ВРАХУВАННЯ ПРУЖИНЕННЯ ПРИ ХУДОЖНЬОМУ КУВАННІ ВОЛЮТОПОДІБНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Для волюти у вигляді спіралі Архімеда, яка умовно поділена на 5 ділянок, наведений алгоритм розрахунків збільшення радіусів та кутів гнуття кожної з ділянок. Розрахунки показують, що пружинення тим інтенсивніше, чим більше відношення радіусу гнуття до товщини для кожної ділянки волюти, вище міцнісні властивості сталей, їх схильність до зміцнення в процесі деформації. Значне пружинення фіксується, якщо радіуси гнуття та товщина відрізняються майже на порядок.

**Ключові слова:** пружинення, волюта, радіус гнуття, кут гнуття, степенева функція.

**O.S. Anishchenko, A.V. Hushchyn, V.V. Kukhar, A.G. Prysiazhnyi. Taking into account springing in art forging of volute products.** The article shows that bending of volutes consists of two stages. At the stage of loading there is an elastic and plastic deformation of the workpiece. Elastic deformation is described by a linear function (Hooke's law), plastic deformation is described by an exponential function of strain stress in the workpiece. In the second stage of bending a partial restoration of the original shape of the workpiece takes place. For a volute in the form of an Archimedes spiral, which is conditionally divided into 5 sections, an algorithm for calculating the increase in radii

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [aas540628@gmail.com](mailto:aas540628@gmail.com)

<sup>2</sup> студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [titan482@gmail.com](mailto:titan482@gmail.com)

<sup>3</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com](mailto:ORCID:0000-0002-4863-7233,kvv.mariupol@gmail.com)

<sup>4</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0001-8062-075X, agr87514@gmail.com](mailto:ORCID:0000-0001-8062-075X,agr87514@gmail.com)

and bending angles of each section has been given. Calculations show that the springing is more intense, the greater is the ratio of bending radius to thickness for each section of the volute, and the higher is the strength properties of steels, as well as their tendency to harden during deformation, which is determined by the coefficients of an exponential function. Even small additions of silicon, in 09Г2С and 09Г2 steels, increase the strength of the first steel and its springing when bending all parts of the volute. For 08Х22Н6Т stainless steel the increase in a bending radius is 3,5-4 times more, than for other steels. In addition, the bending force increases significantly. Therefore, volutes from steel 08Х22Н6Т are not made in a cold condition as a rule. Significant springing occurs when the bending radii and thickness differ by almost an order of magnitude. The results of the calculations were experimentally verified on 08Х22Н6Т and 10 steel billets with a square side in the cross section of 2, 4 and 8 mm. The graphs show that the relative springing of the workpieces made of 08Х22Н6Т steel is higher than that of steel 10 for sections of the volute with a minimum bending radius of 1.5-2 times, with a maximum bending radius of 2.3-2.6 times. In general, the springing calculations correspond to the experimental results, the error does not exceed 16%.

**Keywords:** springing, volute, bending radius, bending angle, exponential function.

**Постановка проблеми.** Кування – найдревніша технічна професія в історії людства, вона вважається священною у всіх світових релігіях. Навіть боги (Гефест, Вулкан, Сварог...) були ковалями, а родоначальником ковальської технології у людей був Тувалкаїн, «...ковач всіх знарядь з міді та заліза» (Буття, 4:22).

Здавна ковальські вироби вважалися художніми витворами мистецтва [1, 2], якими прикрашали домівку, одяг, інструменти та ін. Найбільш поширеними декоративними елементами в художньому куванні були волюти [3] – спіралевидні завитки з кружечком в центрі (рис. 1). Волюти і наразі застаються головними елементами для прикрас в решітках, огорожах, воротах, світильниках і т. ін., виготовлених як в класичному стилі, так і в стилях ампір, модерн, рококо, бароко [4, 5].

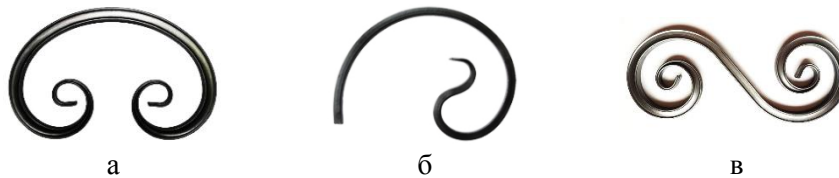


Рис. 1 – Волюти (а, в) та волютоподібні вироби (б)

Важливою задачею при вільному куванні волюти є отримання правильної спіральної форми, якому заважає пружинення заготовки при гнутті [6, 7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метою досліджень пружинення при гнутті заготовки є його усунення або врахування за рахунок вдосконалення технології і інструменту (шаблонів, кондукторів тощо). Волюти виготовляють з нагрівом металу і нахолодно. Якщо волюти призначені для прикрас або потрібно виготовляти значну їх кількість, потрібен шаблон (рис. 2), в контури якого повинні вписуватися кожен оборот спіралі і товщина заготовки, призначеної для виготовлення спіралі. Формоутворююча поверхня шаблону повинна мати кривизну, відмінну від кривизни заготовки, що згинається, на величину пружинення [3]. Отже саме на цю величину кут загину в шаблоні повинен бути більше, ніж заданий.

Відомі роботи, в яких: 1) пружинення усували гнуттям спіралей з протитиском [8] або з використанням протитискної подушки [9]; 2) розміри деталей, що пружиняють при гнутті, виправляють термомеханічною обробкою, суміщеною з гнуттям [10]; 3) враховують пружинення превентивними розрахунками розмірів деталей за переходами при багатопереходному гнутті листів [11], гнутті з подвійним вигином [12], ротаційному гнутті листів [13], вигину товстолістових заготовок з важкодеформівного матеріалу [14]. Замість трудомістких експериментів інтенсивно впроваджуються числові методи розрахунків [9, 12] та комп'ютерне моделювання [8, 9].



Рис. 2 – Ковадло та шаблони для художнього кування

Проте в роботі [15] показано, що більшість теорій пружинення при гнутті використовують лінійні залежності між геометричними параметрами заготовок та кутом пружинення, хоча для більш повної картини при прогнозуванні пружинення потрібні нелінійні залежності, окремо для малих і великих кутів гнуття. Числові програмні методи мають істотні обмеження. Або метод можна застосовувати для чисельного розрахунку в області пружних або пружно-пластичних деформацій, або – для чисельного розрахунку в області пластичних деформацій, що обмежує можливість чисельного розрахунку пружинення при малих кутах, де присутні всі три області.

**Мета статті** – знаходження кривизни і кута загину, на які необхідно провести гнуття заготовки, з тим, щоб отримати їх значення після пружинення, що дорівнюють заданим.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконували на заготовках зі стороною квадрата в перерізі  $h = 2; 4; 8; 12$  мм, які вирізали з гарячекатаних листів зі сталей 09Г2, 09Г2С, зі сталі 10 після нормалізації, а також з гарячекатаних та загартованих листів сталі 08Х26Н6Т. Волюти згинали нахолодно у вигляді спіралі Архімеда. Перед гнуттям поверхню заготовок обробляли до шорсткості  $Ra 2,5$ .

Радіуси гнуття вимірювали радіусометром Vogel, кути гнуття – гоніометром СГ-ІЦ з похибками відповідно  $\pm 0,02$  мм і  $1^\circ$ . Хімічний склад і механічні властивості листів наведені в таблиці 1 і відповідають заводським сертифікатам.

Таблиця 1

Хімічні та механічні властивості прокату, що використовується

Марка сталі	Хімічний склад, % за масою									Механічні властивості			
	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni	Ti	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon_B$ , %	E, МПа
09Г2	0,09	0,26	1,65	0,030	0,028	-	-	-	-	305	440	21	$2,1 \cdot 10^5$
09Г2С	0,10	0,64	1,62	0,032	0,029	-	-	-	-	325	470	21	$2,1 \cdot 10^5$
10	0,11	0,31	0,43	0,036	0,031	-	-	-	-	205	330	31	$2,0 \cdot 10^5$
08Х26Н6Т	0,07	0,69	0,73	0,022	0,028	0,28	21,8	5,6	0,62	340	590	20	$1,98 \cdot 10^5$

Гнуття заготовки у волютоподібну форму складається з двох стадій. На стадії навантаження відбувається пружно-пластичне формозмінення заготовки. Пружна деформація описується лінійною функцією (законом Гука):

$$\sigma = E\varepsilon, \tag{1}$$

пластична деформація – степеневою функцією напруження в заготовці  $\sigma$  від деформації  $\varepsilon$ :

$$\sigma = k\varepsilon^n, \tag{2}$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу;  $k$  – модуль зміцнення;  $n$  – показник деформаційного зміцнення матеріалу заготовки.

Пластична деформація, крім пружної, з'являється, коли заготовка при гнутті досягає ступеню деформації  $\varepsilon_{pp}$ , який розраховується за формулою:

$$\varepsilon_{pp} = (k/E)^{1/1-n}. \tag{3}$$

На другій стадії гнуття відбувається часткове відновлення вихідної форми заготовки. Зазвичай, при виготовленні волют заготовки вигинають на велику кривизну, тому згідно з [6] замість закону Гука доцільно використовувати при розрахунках степеневу функцію. Параметри  $k$  і  $n$  можна визначити формулами:

$$n = \frac{\ln(\sigma_B/\sigma_{0,2})}{\ln(\varepsilon_B/\varepsilon_{0,2})}, \quad k = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B^n}.$$

Значення параметрів формул (1-3) наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри апроксимації деформації зразків степеневою функцією (2)

Марка сталі	Параметри		
	$k$	$n$	$\varepsilon_{pp}$
Сталь 10	404,5	0,174	$5,47 \cdot 10^{-4}$
09Г2	561,2	0,157	$8,87 \cdot 10^{-4}$
09Г2С	650,4	0,156	$1,06 \cdot 10^{-3}$
08Х22Н6Т	2464,7	0,239	$3,14 \cdot 10^{-3}$

Розглянемо формоутворення волюти, яка закручена зі змінним радіусом кривизни з прутка, квадратний перетин якого має сторону  $h$ . Формули, що визначають зміну кривизни  $i$ -тої ділянки волюти  $V_i^{pp}$  внаслідок пружинення і її значення  $W_i$ , яке залишилося після розвантаження, приймуть такий вигляд (для перетину з двома осями симетрії):

$$V_i^{pp} = V_i[v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(hV_i)^{n-1}];$$

$$W_i = V_i\{1 - [v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(hV_i)^{n-1}]\},$$
(4)

де  $V_i$  – кривизна зігнутого елемента прутка відносно нейтрального шару деформації;  $v = \frac{2}{hV_i} \left(\frac{k}{E}\right)^{1/1-n}$  – коефіцієнт, що характеризує відносну величину пружної зони по висоті перетину;  $\beta = \frac{6k}{E2^{n(n+2)}}$  – сталий для кожного металу коефіцієнт, який визначається через його механічні властивості;  $\beta \cdot 10^3 = 6,67, 7,85, 4,95, 28$  для сталей 09Г2, 09Г2С, 10 і 08Х22Н6Т.

Якщо ввести у формули (4) відносний радіус кривизни  $r_i^p$ :

$$r_i^p = R_i^p/h = 1/hV_i,$$
(5)

де  $R_i^p$  – радіус кривизни центрального шару зігнутого елемента, то формула для розрахунків відносної кривизни  $w_i^p = W_i/V_i$  будемо мати вигляд:

$$w_i^p = \frac{r_i^p}{1 - [v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(r_i^p)^{n-1}]}.$$
(6)

Як правило, контур волюти визначається або логарифмічною, або спіраллю Архімеда. Наприклад, для другого випадку, якщо треба збудувати шаблон для виготовлення волюти зі сталі 09Г2С, останню спочатку поділяють на 5 ділянок [7] (рис. 3).

Хай буде для першої ділянки  $R_1^p = 13$  мм. Тоді  $r_1^p = R_1^p/h = 13/12 = 1,083$ . Дві залежності (1-2) визначають, що перехід лінійної залежності в степеневу відбувається при відносній деформації  $\varepsilon_{pp}$ :

$$\varepsilon_{pp} = \left(\frac{660,4}{2,1 \cdot 10^5}\right)^{1/1-0,156} = 1,08 \cdot 10^{-3}.$$
(7)

Далі обчислюємо  $v, \beta$  і  $w_1^p$ :

$$v = \frac{2 \cdot 0,00108}{12 \cdot 1/13} = 0,00234; \quad \beta = \frac{6 \cdot 660,4}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 2^{0,156(0,156+2)}} = 0,00785;$$

$$w_1^p = \frac{1,083}{1 - [0,00234^3 + (1 - 0,00234^{0,156+2}) \cdot 0,00785 \cdot 1,083^{1-0,156}]} = 1,092.$$

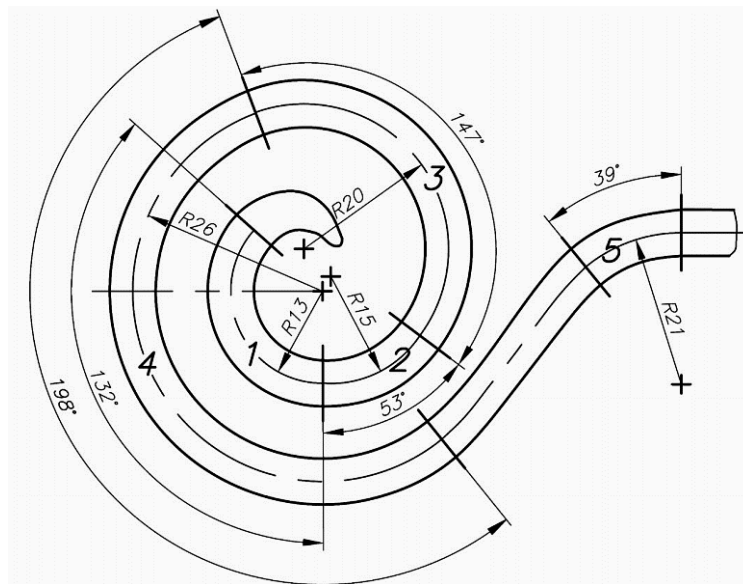


Рис. 3 – Схема умовного поділення волути на ділянки

Отже при гнутті внаслідок пружинення параметр  $R_1^p$  для першої ділянки волути збільшиться до  $R_1^{pp} = hw_1^p = 13,11$  мм, тобто збільшення радіусу кривизни складе:

$$z = R_1^{pp} - R_1^p = 13,11 - 13 = 0,11 \text{ мм.}$$

Вважаючи, що зміна кута гнуття волуті  $\theta_i$  пропорційна зміні радіусу гнуття внаслідок пружинення, отримуємо для кута гнуття першої ділянки волуті  $\theta_1 = 132^\circ$  його фактичне значення:

$$\theta_1^\phi = \theta_1 \cdot R_1^p / R_1^{pp} = 132 \cdot 13 / 13,11 = 130,89^\circ.$$

Для того, щоб при гнутті волуті отримати необхідне значення кута  $\theta_1 = 132^\circ$ , заготовку потрібно згинати на кут  $\theta_1^p$ , що дорівнює:

$$\theta_1^p = \frac{\theta_1}{\theta_1^\phi / \theta_1} = \frac{132}{130,89 / 132} = 133,12^\circ,$$

тобто більший ніж  $\theta_1$ , на величину:

$$f = \theta_1^p - \theta_1 = \theta_1^p - \theta_1 = 133,12 - 132 = 1,12^\circ,$$

де  $i$  – номер ділянки волуті.

Аналогічні розрахунки були виконані для всіх ділянок волут (рис. 3), що були зігнуті із заготовок ( $h = 12$  мм) чотирьох марок сталей (табл. 1). На рис. 4-5 представлені діаграми, які показують вплив пружинення на параметри збільшення  $z$  і  $f$  радіусів та потрібних кутів кривизни при виготовленні волут. Графіки показують, що пружинення тим інтенсивніше, чим більше співвідношення  $R_i^p / h$  для кожної ділянки волуті, вище міцнісні властивості сталей, їх схильність до зміцнення в процесі деформації, яка визначається параметрами  $n$  і  $k$ . Навіть незначні добавки кремнію, що відрізняють сталі 09Г2С і 09Г2, збільшують показники міцності першої сталі та її пружинення при гнутті всіх ділянок волуті. Для нержавіючої сталі 08Х22Н6Т параметр  $z$  в 3,5-4 рази більший, ніж для інших сталей, до того ж суттєво зростає зусилля гнуття. Тому в холодному стані волуті зі сталі 08Х22Н6Т, як правило, не виготовляють.

Хоча діаграми мають дещо різний вигляд, але значення  $z$  і  $f$  відносно радіуса кривизни і кута кожної ділянки знаходяться між собою в пропорційних залежностях. Ці значення мінімальні для першої і максимальні для четвертої ділянки волуті. В зв'язку з цим для цих ділянок волуті були розраховані відносні зміни  $Q$  радіусів кривизни внаслідок пружинення:

$$Q = (R_i^{pp} - R_i^p) / R_i^p \cdot 100 \%,$$

де  $R_i^{pp}$  – радіус кривизни центрального шару зігнутого елемента після пружинення.

Результати розрахунків були експериментально перевірені на заготовках зі сталей 10 та 08Х22Н6Т зі стороною квадрата в перерізі 2, 4 і 8 мм (рис. 6). Графіки показують, що відносне

пружинення  $Q$  заготовок зі сталі 08Х22Н6Т вище, ніж зі сталі 10 для першої ділянки волоти в 1,5-2 рази, для четвертої – в 2,3-2,6 рази. В цілому розрахунки пружинення відповідають експериментальним результатам, похибка у визначенні параметра  $Q$  не перевищує 16%.

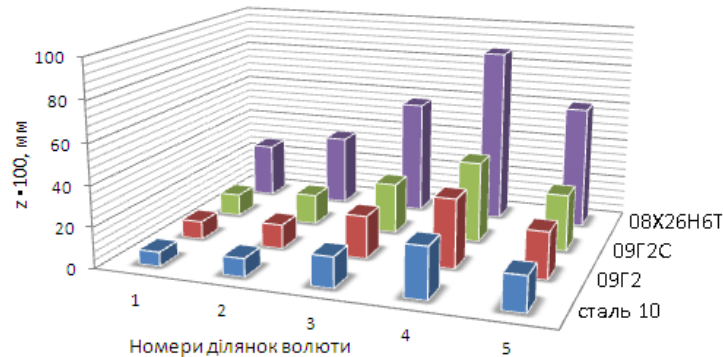


Рис. 4 – Збільшення радіусів кривизни на п'ятих ділянках волот внаслідок пружинення при гнутті заготовок з різних марок сталей

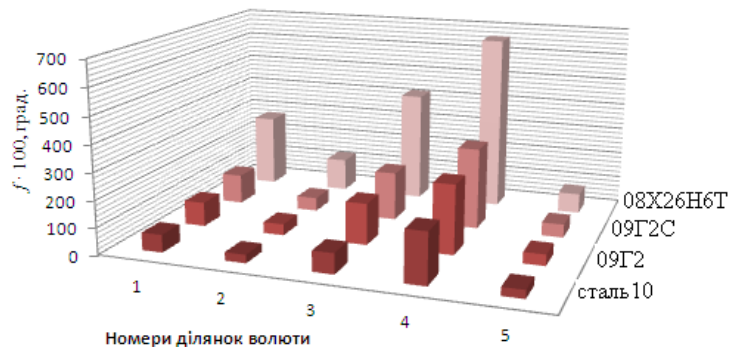


Рис. 5 – Збільшення кута  $\theta$ , при гнутті ділянок волоти, яке потрібне для забезпечення його значень на рис. 3 після пружинення

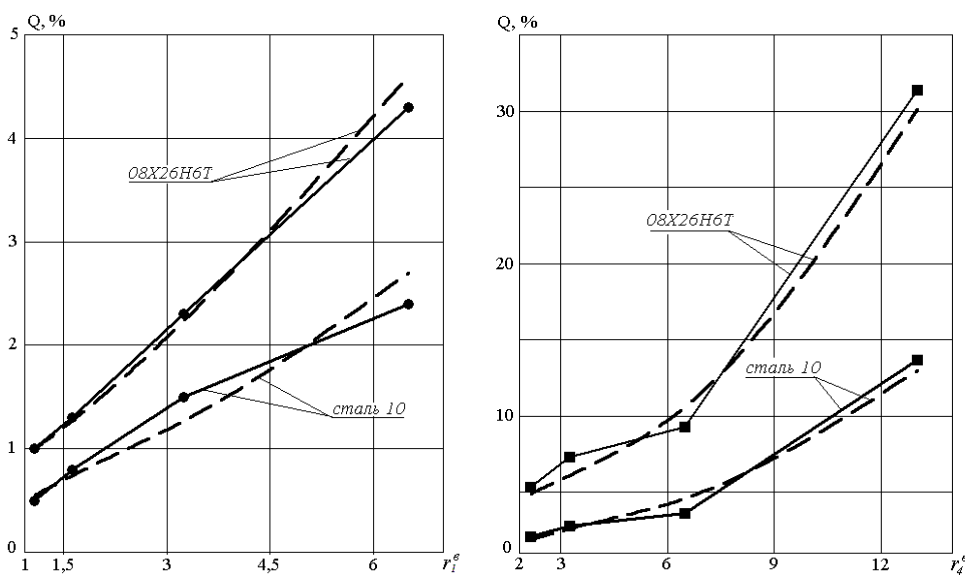


Рис. 6 – Вплив відносного радіуса волоти на відносне пружинення заготовок: ліворуч – для ділянки 1; праворуч – для ділянки 4; суцільні лінії – експериментальні дані, штрихові лінії – розрахункові дані



Якщо припустимо пружинення з параметром  $Q = 10\%$ , то його слід враховувати при гнутті заготовок з  $R_i^p/h \geq 10$  і 7 відповідно для сталі 10 і 08X26Н6Т. Збільшення  $Q$  до 20% призводить до того, що пружинення враховується тільки для заготовок зі сталі 08X26Н6Т з  $R_i^p/h \geq 10$ .

Результати роботи були використані при виготовленні шаблонів і художньому куванні виробів (рис. 7), які були відзначені нагородами на ковальфестах в Маріуполі, Бердянську і Рівне.



«Чумацький шлях»

«Азовська креветка»

Мангальний набір

Рис. 7 – Експонати художнього кування з волютоподібними елементами (автор – А.В. Гуцин)

### Висновки

Пружинення заготовок при гнутті волют можна розрахувати з похибкою не більш 16% на основі степеневих функцій напруження від деформації для сталей, що використовуються, та співвідношень між радіусами кривизни нейтрального шару ділянок волоти та товщиною заготовки. Значне пружинення фіксується, якщо останні параметри відрізняються майже на порядок.

### Перелік використаних джерел:

1. Light J.D. Observations concerning the hand forging of wrought iron / J.D. Light // *Materials Characterization*. – 2000. – Vol. 45. – Pp. 327-340.
2. Sherby O.D. Ancient blacksmiths the Iron Age, Damascus steels and modern metallurgy / O.D. Sherby, J. Wadsworth // *Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 117. – Pp. 347-355.
3. Богман К. Художественная ковка и слесарное искусство / К. Богман, Г. Семерак. – М. : Книга по требованию, 2016. – 231 с.
4. Cast iron street furniture: A historical review / C. Soffritti [et al.] // *Endeavour*. – 2020. – Vol. 44, iss. 3. – Pp. 1-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2020.100721>.
5. Swenson E.R. Crucibles of power: Forging copper and forging subjects at the Moche / E.R. Swenson, J.P. Warner // *Journal of Anthropological Archaeology*. – 2012. – Vol. 31. – Pp. 314-333. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2012.01.010>.
6. Лысов М.И. Формообразование деталей гибкой / М.И. Лысов, Н.В. Сосов. – М. : Машиностроение, 2001. – 388 с.
7. Филиппов Д.И. Инженерная теория расчета геометрических и силовых параметров изготовления гнутых элементов художественной ковки / Д.И. Филиппов, Ю.А. Морозов // Молодежный научный форум: технические и математические науки. – 2014. – № 11 (18). – С. 71-79.
8. Lee S.-I. Mg Scroll Forging with AZ80 under Warm Forming Condition / S.-I. Lee, J. Yoon, J. Lee // *International journal of precision engineering and manufacturing*. – 2014. – Vol. 15, no. 7. – Pp. 1473-1477. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0493-8>.
9. Phanitwonga W. FE-analysis of channel width effects on spring-back characteristics in the U-bending process / W. Phanitwonga, S. Thipprakmasa // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 183. – Pp. 17-22. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.005>.

10. Sajan M. A novel method for the spring-back analysis of a hot stamping steel / M. Sajan, M. Amirthalingam, U. Chakkingal // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 11. – Pp. 227-234. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.017>.
11. Kukhar V. Spring-back effect during multi-pass bending of sheet blanks / V. Kukhar, M. Nahnibeda, O. Radushev // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501066>.
12. Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming / M.H. Parsa, S.N. Al-ahkami, H. Pishbin, M. Kazemi // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 41. – Pp. 326-337. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.009>.
13. Анищенко А.С. Изготовление цилиндрических обечаек на ротационных листогибочных машинах / А.С. Анищенко // *Захист металургійних машин від поломок* : Зб. наук. пр. – 2014. – № 16. – С. 79-86.
14. Адаптація технології гнуття товстолистової заготовки з важкодеформівного матеріалу до параметрів пресового устаткування / Г.В. Артюх, В.В. Кухар, О.В. Грушко, Т.І. Молодецька // *Захист металургійних машин від поломок* : Зб. наук. пр. – 2012. – № 14. – С. 110-116.
15. Сапрыкин Б.Ю. Анализ способов расчета пружинения листовых материалов / Б.Ю. Сапрыкин // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2013. – № 2 (16), т. 2. – С.133-139.

#### References:

1. Light J.D. Observations concerning the hand forging of wrought iron. *Materials Characterization*, 2000, iss. 45, pp. 327-340.
2. Sherby O.D. Wadsworth J. Ancient blacksmiths the Iron Age, Damascus steels and modern metallurgy. *Materials Processing Technology*, 2001, iss. 117, pp. 347-355.
3. Bogman K., Semerak G. *Khudozhestvennyya kovka i slesarnoe iskusstvo* [Artistic forging and metalwork]. Moscow, Kniga po trebovaniyu Publ., 2016. 231 p. (Rus.)
4. Soffritti C., Calzolari L., Chicca M., Bassi Neri R., Neri A., Bazzocchi L., Garagnani G.L. Cast iron street furniture: A historical review. *Endeavour*, 2020, vol. 44, iss. 3, pp. 1-15. **doi: 10.1016/j.endeavour.2020.100721.**
5. Swenson E.R. Warner J. P. Crucibles of power: Forging copper and forging subjects at the Moche. *Journal of Anthropological Archaeology*, 2012, iss. 31, pp. 314-333. **doi: 10.1016/j.jaa.2012.01.010.**
6. Lysov M.I., Sosov N.V. *Formoobrazovaniye detaley gibkoy* [Shaping of flexible parts]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2001. 388 p. (Rus.)
7. Filippov D.I., Morozov Yu.A. Inzhenernaya teoriya rascheta geometricheskikh i silovykh parametrov izgotovleniya gnutykh elementov khudozhestvennoy kovky [Engineering theory of calculating the geometric and power parameters of the manufacture of bent elements of artistic forging]. *Molodezhnyi nauchnyi forum: tekhnicheskkiye i matematicheskkiye nauky – Youth Science Forum: Engineering and Mathematical Sciences*, 2014, no. 11 (18), pp. 71-79 (Rus.)
8. Lee S.-I. Yoon J., Lee J. Mg Scroll Forging with AZ80 under Warm Forming Condition. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2014, iss. 15, no. 7, pp. 1473-1477. **doi: 10.1007/s12541-014-0493-8.**
9. Phanitwong W., Thipprakmasa S. FE-analysis of channel width effects on spring-back characteristics in the U-bending process. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 15, no. 7, pp. 1473-1477. **doi: 10.1007/s12541-014-0493-8.**
10. Sajan M. Amirthalingam M., Chakkingal U. A novel method for the spring-back analysis of a hot stamping steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 11, pp. 227-234. **doi: 10.1016/j.jmrt.2021.01.017.**
11. Kukhar V. Nahnibeda M., Radushev O. Spring-back effect during multi-pass bending of sheet blanks. *E3S Web of Conferences*, 2019, pp. 1-9. **doi: 10.1051/e3sconf/201913501066.**
12. Parsa M.H., Al-ahkami S.N., Pishbin H., Kazemi M. Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming. *Materials and Design*, 2012, iss. 41, pp. 326-337. **doi: 10.1016/j.matdes.2012.05.009.**
13. Anishchenko A.S. Izgotovlenie tsilindricheskykh obechayek na rotatsionnykh listogibochnykh mashinakh [Production of cylindrical shells on rotary plate bending machines]. *Zakhyst*



- metallurgiykh mashin vsd polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2014, no. 16, pp. 79-86. (Rus.)
14. Artiukh G.V., Kukhar V.V., Grushko O.V., Molodetska T.I. Adaptatsiia tekhnologii gnuttia tovtolistovoї zagotovki z vazhkodeformivnogo materialu do parametriv presovogo ustatkuvannia [Adaptation of technology of bending of thick-sheet preparation from heavy-deformable material to parameters of the press equipment]. *Zakhyst metallurgiykh mashin vsd polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2012, no. 14, pp. 110-115. (Ukr.)
15. Saprykin B.Yu. Analiz sposobov rascheta pruzhynenya lyastovykh materialov [Analysis of methods for calculating the springing of sheet materials]. *Izvestiya MGTU «МAMI»*, 2013, vol. 2, no. 2 (16), pp. 133-139 (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 30.04.2021

УДК 621.785:669.15-194.2

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240582

© Ткаченко І.Ф.<sup>1</sup>, Мірошніченко В.І.<sup>2</sup>

### ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ НЕРІВНОВАЖНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ДЕГРАДАЦІЇ ЇХНЬОЇ ВНУТРІШНЬОЇ БУДОВИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

*Розроблено теоретичний підхід до індивідуального прогнозування характеристик енергетичного стану термодинамічних систем (ТС) у нерівноважних умовах функціонування, що супроводжуються передбачуваною та випадковою деградацією їхньої внутрішньої будови та функціональних властивостей. Отримано аналітичні співвідношення задля розрахунку базових параметрів, що забезпечують ефективне функціонування ТС з урахуванням індивідуальних особливостей їхньої внутрішньої будови. Розроблений загальний підхід застосовано задля прогнозування інтервалу температур розвитку дислокаційної повзучості дисперсно-зміцненої сталі ASTM A316 промислового виробництва. Отримані результати та їхнє фундаментальне теоретичне підґрунтя засвідчують можливість використання розробленого підходу у різних сферах застосування: техніка, управління, економіка, медицина тощо.*

**Ключові слова:** *термодинамічні системи, нерівноважні умови функціонування, передбачувана та випадкова деградація внутрішньої будови, прогнозування характеристик енергетичного стану.*

**I.F. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko. Prediction of an energy state for nonequilibrium thermodynamic systems under service conditions of their structure and performance degradation.** *A general approach is developed to individual analytic prediction of an energy state indexes for thermodynamic systems (TS) working under the nonequilibrium service conditions that cause determined and random degradation of the TS structures and performance: losses nominal levels of structure components and service properties characteristics. The following TS were proposed to be considered as relevant ones for the analysis: heat-resistant alloys; technology processes; climate, ecology and biology systems. Based on the energy conservation law, analytic relations were obtained for the TS*

<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф., Донецький національний медичний університет, м. Маріуполь, [ift955@gmail.com](mailto:ift955@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0002-5956-7867](http://ORCID:0000-0002-5956-7867), [miroshnichenko\\_v\\_i@pstu.edu](mailto:miroshnichenko_v_i@pstu.edu)