

В.Л. ЧУХЛІБ, С.О. ГУБСЬКИЙ, А.О. ОКУНЬ

ФОРМАЛІЗОВАНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЛА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЕРЕХОДІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

У статті розглядаються формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при виробництві гнутих профілів. Аналізуються фактори, що впливають на кількість переходів при розробці схеми профілювання, вказано на неоднозначність, наприклад, фактору товщина металу. Дані фактори розділено на підгрупи: геометрія, матеріал, інші операції на лінії, характеристика стана. Розглядаються критерії вибору кута підгинання за технологічний перехід профілювання. Проаналізовано вісім різних методів визначення числа переходів профілювання. Узагальнюється інформація, виділяються критерії порівняння, що дозволяє виділити найбільш оптимальні формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при профілюванні, що базуються на емпіричних підходах. Вказується на необхідність застосування автоматизації даних розрахунків та застосування набутого емпіричного досвіду в машинному навчанні.

Ключові слова: профілювання; перехід; схема; розрахунок; заготовка; автоматизація; напруження; геометрія; профіль; технологія; кут; схема

В. Л. ЧУХЛЕБ, С. А. ГУБСКИЙ, А. А. ОКУНЬ

ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

В статье рассматриваются формализованные подходы к определению числа технологических переходов при производстве гнутых профилей. Анализируются факторы, влияющие на количество переходов при разработке схемы профилирования, указано на неоднозначность, например, фактора толщина металла. Данные факторы разделены на подгруппы: геометрия, материал, другие операции на линии, характеристика стана. Рассматриваются критерии выбора угла подгибки за технологический переход профилирования. Проанализированы восемь различных методов определения числа переходов профилирования. Обобщается информация, выделяются критерии сравнения, что позволяет выделить наиболее оптимальные формализованные подходы к определению числа технологических переходов при профилировании, основанные на эмпирических подходах. Указывается на необходимость применения автоматизации данных расчетов и применения приобретенного эмпирического опыта в машинном обучении.

Ключевые слова: профилирование; переход; схема; расчет; заготовка; автоматизация; напряжение; геометрия; профиль; технология; угол; схема

V. CHUKHLIB, S. GUBSKYI, A. OKUN

FORMALIZED APPROACHES TO DETERMINING THE NUMBER OF TECHNOLOGICAL TRANSITIONS IN THE PRODUCTION OF BENT PROFILES

The article is devoted to the formalized approaches to determine the number of technological passes in the production of bent profiles. The influencing factors of the number of passes during the development of the profiling scheme are analyzed, the ambiguity is indicated, for example, the metal thickness factor. These factors are divided into subgroups: geometry, material, other operations on the line, the characteristics of the mill. Criteria for choosing the bending angle for the technological pass of profiling are considered. Eight different methods for determining the number of profiling passes are analyzed. The information is generalized, comparison criteria are highlighted, which makes it possible to identify the most optimal formalized approaches to determine the number of technological passes during profiling. The need for the automation of these calculations and the application of the acquired empirical experience in machine learning is indicated.

Keywords: profiling; transition; circuit; calculation; part; automation; stress; geometry; profile; technology; angle; circuit

Вступ. Однією з початкових операцій при розробці схеми профілювання та режиму формування є визначення числа переходів. Від цього кроку залежать економічні характеристики, якісні показники та стабільність процесу виготовлення продукції [1].

Для визначення оптимального числа переходів при профілюванні існує два підходи. Перший підхід базується на напрацьованому експериментальному досвіді і найбільш широко використовується у вітчизняному профілюванні. Але з розвитком автоматизованих розрахунків [2–4] отримав розвиток другий підхід – попередній розрахунок переходів базуючись на математичних залежностях, що виражені у формулах.

Мета роботи – здійснити аналіз існуючих формалізованих підходів до визначення оптимального числа переходів при розробці схеми профілювання. На основі здійсненого аналізу обрати напрямком подальших досліджень.

Аналіз факторів, що впливають на кількість переходів. На визначення необхідного числа технологічних переходів для отримання, в результаті, продукції із заданими якісними показниками та стабільністю процесу виготовлення профілів, впливає багато факторів. Загалом ці фактори можливо розділити на такі під-

групи: геометрія, матеріал, інші операції на лінії, характеристика стана. У табл. 1 дана узагальнена інформація, наведені фактори, що впливають на кількість переходів при розробці схеми профілювання (за основу взято [5]).

Деякі фактори, що наведені у табл. 1, мають неоднозначний вплив. Наприклад, фактор товщина металу. При недостатньому запасі міцності оснащення стана (стани легкого типу), збільшення товщини металу призведе до збільшення числа переходів. Але, якщо зусилля та міцність оснащення достатні, то збільшення товщини металу підвищить його стійкість до виникнення хвилястості у поздовжньому напрямі і, як наслідок, може призвести до зменшення числа переходів (рис. 1).

Підходи до визначення числа технологічних переходів. Основними критеріями вибору кута підгинання за технологічний перехід профілювання:

- створення умов, що виключатимуть у процесі формотворення втрату стійкості крайніх плоских елементів;
- стабільність процесу профілювання;

$$c = g \cdot \cot \psi, \quad c = (n-1) \cdot d,$$

$$g \cdot \cot \psi = (n-d) \cdot d \rightarrow n = \frac{g}{d} \cot \psi + 1, \quad (2)$$

де n – кількість технологічних переходів;

c – довжина, мм;

g – висота кінцевого профілю, мм;

ψ – кут формування, град;

d – горизонтальна відстань між формуючими переходами, мм.

Значення кута формування залежить від пластичності матеріалу заготовки профілю. У результаті проведених експериментів встановлено, що середнє значення $\psi = 1,5^\circ$ рекомендується для низьковуглецевих сталей.

Якщо кінцевий профіль має складну форму, то «Метод формування кута» має бути використаний до кожного згину окремо, а потім, де є можливість, їх об'єднати.

Метод 3. Також, є підхід для розрахунку необхідного числа технологічних переходів при профілюванні шляхом вибору граничного параметру – «обмеження напруження на краю» заготовки – рис. 4 [7]:

$$\sigma = \frac{e^2 \cdot E \cdot (1 - \cos \alpha)}{\ell^2}, \quad (3)$$

де σ – напруження, МПа;

e – висота основи, мм;

E – модуль пружності, МПа;

ℓ – довжина вигину, мм;

α – кут вигину, град.

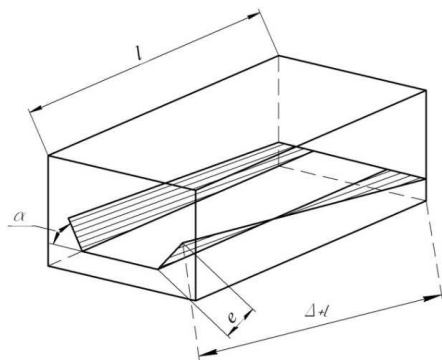


Рисунок 4 – Розрахунок необхідного числа переходів профілювання шляхом вибору граничного параметру – обмеження напруження на краю заготовки [7]

Метод 4. У роботі [8] пропонується процедуру визначення числа переходів залежно від «функції форми» –

$$F = \begin{cases} b^{total} \cdot n \cdot s_0 & \text{– вузький профіль;} \\ B \cdot h \cdot \frac{n}{W} & \text{– широкий профіль,} \end{cases} \quad (4)$$

де b^{total} – сумарна довжина полки, що підгинається, мм;

n – число зон згину;

s_0 – товщина профілю, мм;

B, W – ширина заготовки та готового профіля відповідно, мм;

h – висота профілю, мм.

Метод 5. Також при визначенні числа технологічних переходів при профілюванні необхідно враховувати штучний або неперервний процес формовки [9] –

$$N_G = \frac{a_{total}}{\theta} + \Delta N, \quad (5)$$

де a_{total} – сумарний кут підгинання, град; θ – кут підгинання за один перехід, град; ΔN – додаткове число переходів, що враховує метод профілювання (штучний або неперервний).

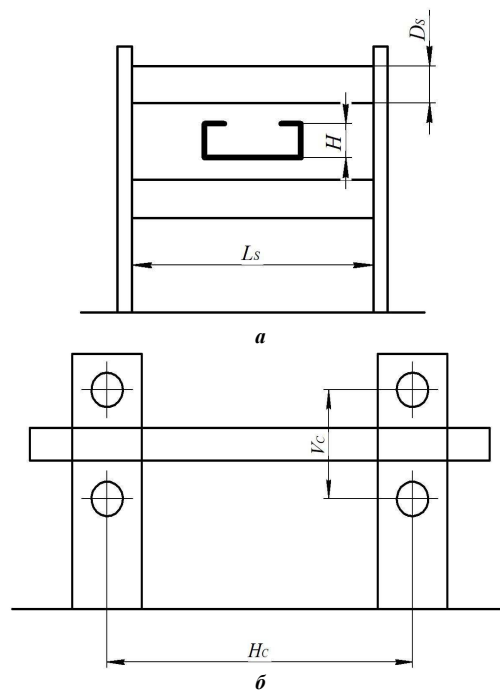


Рисунок 5 – Передній (а) та боковий (б) вид профілювального стану

Метод 6. Метод попереднього визначення числа технологічних переходів при профілюванні пропонується в роботі [10] – рис. 5 – і базується на використанні залежностей – формула (6):

$$L_s \geq 1.2 \cdot B_B, \quad D_s \geq \frac{L_s}{7}, \quad V_c \approx 1.5 \cdot D_s + 2 \cdot H,$$

$$H_c \approx (2 \div 2.5) \cdot V_c, \quad n > \frac{75 \cdot u}{H_c} \quad (6)$$

де H_c – горизонтальна відстань між клітями (на початку профілювання підставляється менший коефіцієнт, у кінці – більший), мм;

V_c – вертикальна відстань між центрами формувальних валків, мм;

L_s – довжина формувального валка, мм;

D_s – діаметр формувального валка, мм;

H – висота готового профілю, мм;

B_B – ширина полоси-заготовки для профіля, мм;

n – число технологічних переходів при профілюванні;

u – відстань від краю полоси-заготовки до краю готового профілю (рис. 6)

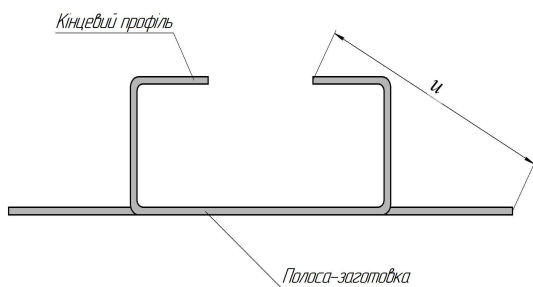


Рисунок 6 – Схема для визначення відстані від краю полоси-заготовки до краю готового профілю

Метод 6. При виробництві профілів методом «інтенсивного деформування» розрахунок необхідного числа технологічних переходів пропонують виконувати за формулою [11]

$$N = \frac{\Delta}{L_M \cdot \beta} \cdot \sqrt{\frac{H}{W}} \cdot \sqrt{\frac{s}{k \cdot T}} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_B} \cdot \sqrt[3]{n} \cdot \frac{2 \cdot \xi}{\pi} \cdot \eta, \quad (7)$$

де Δ – зміщення кромки заготовки, мм;

L_M – міжкільтова відстань стана, мм;

β – граничний кут «стиснення» заготовки, рад;

H, W – висота та ширина профіля (після повороту, якщо необхідно), мм;

s – товщина заготовки, мм;

k – квалітет перерізу профіля;

T – допуск розміру перерізу для квалітету k , мм;

σ_s, σ_B – відповідно межа плинності та міцності матеріалу заготовки, МПа;

n – число зон згину профіля;

ξ – сумарний кут звертання елемента, рад;

η – безрозмірний форм-модифікатор, що залежить

в загальному випадку від відношення висоти формовки до розміру базового радіуса формуючих валків та від особливостей формотворення. Введений для коригування числа переходів при особливих схемах формотворення на основі статистики та аналізу, в найпростішому випадку дорівнює 1.

Похибка обчислення числа технологічних переходів при профілюванні за формулою (7), зазвичай, не перевищує 0,7.

Для асиметричного профіля, розрахунки повинні бути зроблені для обох його частин. Якщо отримані результати розрахунків технологічних переходів при профілюванні будуть різними, то обирають найбільше число переходів.

Метод 7. При розробці технології профілювання багатоелементних профілів, визначення необхідного числа технологічних переходів у роботі [12] пропонується шляхом застосування «фактору форми», що відображає жорсткість формовки –

$$F = P \cdot n \cdot s, \quad (8)$$

де P – загальна довжина всіх елементів секції, мм;

n – загальне число зон згинів;

s – товщина заготовки, мм.

Вичисливши «фактор форми» за графіком (рис. 7)

знаходиться необхідне число технологічних переходів.

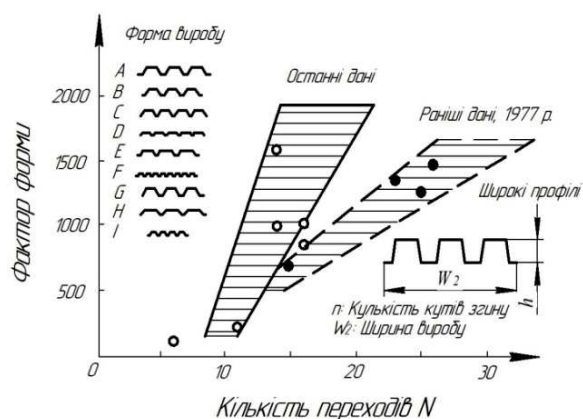


Рисунок 7 – Визначення необхідного числа переходів профілювання багатоелементних профілів шляхом застосування «фактору форми» [11]

Метод 8. В роботі [5] пропонується методика для розрахунку необхідного числа технологічних переходів при профілюванні на основі формули 9:

$$n = \left[0,237 \cdot h^{0,8} + \frac{0,834}{t^{0,87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \cdot \left[\frac{\sigma_s^{2,1}}{40 \cdot \sigma_B} \right]^{0,15} * \quad (9)$$

$$* F \cdot (1 + 0,5 \cdot z) + e + f + 5 \cdot z \cdot F$$

де h – максимальна висота профілю, мм;

t – товщина заготовки, мм;

α – сумарний кут згину, град.;

σ_s, σ_B – відповідно межа плинності та міцності матеріалу заготовки, МПа;

z – коефіцієнт, що враховує наявність отворів та надрізів, знаходиться в інтервалі від 0 до 2;

F – фактор форми (знаходиться в інтервалі від 1 до 1,6);

e – додаткове число переходів при поштучному профілюванні;

f – додаткове число переходів, що пов'язане з точністю поперечного перерізу профіля (знаходиться в інтервалі від 0 до 2).

Висновки. Узагальнюючу інформацію із переходів до визначення числа технологічних переходів при профілюванні зведено у табл. 2.

Як видно з табл. 2, найбільш оптимальні формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при профілюванні – метод 6 «інтенсивного деформування» та метод 8 Т. Halmos. Обидва методи, базуються на емпіричних підходах та дають можливість автоматизувати процес розрахунку.

Подальший розвиток формалізованих підходів до визначення числа технологічних переходів при профілюванні має продовжувати бути нерозривно пов'язаним із автоматизацією розрахунків. Напрацьований емпіричний досвід потрібно застосовувати у машинному навчанні.

Таблиця 2 – Аналіз врахування факторів при застосуванні різних методів визначення числа переходів профілювання

Метод	Фактори						Отвори та надрізи
	Параметри обладнання	Геометрія / механічні властивості матеріалу	Формування багатоселементних профілів	Несиметричність профілів	Поштовхувальний / непереривний процес профілювання	Число зон згину	
1 «прямої лінії»	частково	частково / –	частково	–	невизначено	–	–
2 «формування кута»	частково	частково / –	частково	–	невизначено	–	–
3 «обмеження напруження на краю»	–	частково / +	частково	–	невизначено	–	–
4 «функції форми»	–	+ / –	частково	–	невизначено	+	–
5	–	частково / –	частково	–	+ / +	–	–
6	частково	частково / –	частково	–	невизначено	–	–
7 «інтенсивного деформування»	+	+	+	+	+ / –	+	+
8 «фактору форми»	–	+ / –	+	+	невизначено	+	–
9 Т. Halmos	частково	+	+	+	+	+	+

Список літератури

1. Тришевський І.С., Мирошніченко В. І., Стукалов В. П. і др. Калибровка валков для производства гнутих профилей проката Київ: Техніка, 1980. 168 с.
2. Mahajan P. FE simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties / P. Mahajan P., A. Abrass, and P. Groche //SteelResearchInternational, vol. 89, no. 5, Article ID 1700350. – 2018.
3. Liu X. L., Cao J. G., Chaietal X. T. Experimental and numerical prediction of the local thickness reduction defect of complex cross-sectional steel in cold roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 95, no. 5–8, pp. 1837–1848.
4. Abeyrathna B., B. Rolfe, P. Hodgson, Weiss M. Local deformation in rollforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 88, no. 9–12, pp. 2405–2415.
5. Halmos T. Roll Forming Handbook / Edited by George T. Halmos Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583 p.
6. Corporate author. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, volume 2. SME, Dearborn, Michigan, 4 edition, 1984. 955 p.
7. Schulze G. Kenngrößen für die Entwicklung und den Einsatz von Profilmaschinen. *Maschinenbautechnik*, 1959. No. 8, pp. 181–191.
8. Киути М. Современное состояние CAD/CAM в области профилирования в валках. *Сосэй то како*, 1986. Том 27. № 300. С. 184–192. Перевод с яп. № Б-100/3. Киев: ТПП УССР, 1987. 21 с.
9. Тришевський І. С., Докторов М. Е. *Теоретические основы процесса профилирования*. М.: Металлургия, 1980. 288 с.
10. H. Lundh, B. Carlsson, G. Engberg, L. Gustafsson, and R. Lidgren. *Formningshandboken-Stycksårarande bearbetning och plastiskformning*. SSAB Tunnpå AB, Borlänge, Sweden, 1 edition, 1997.
11. Filimonov A.V., Filimonov S. V. Forming diagrams and roll-passes in roll-forming of sections with middle rigidity elements. *Калибровочное бюро*. 2018. №12. С. 34–40.
12. Ona H., Jimma T., Kozono H. A Computer Aided Design System for Cold Roll Forming, *Advanced Technology of Plasticity*. 1984. Vol. 1, pp. 508–511.

References (transliterated)

1. Trishevskiy I.S., Miroshnichenko V. I., Stukalov V. P. i dr. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutih profiley prokata KiYiv: TehnIka, 1980. 168 p.
2. Mahajan P. FE simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties / P. Mahajan P., A. Abrass, and P. Groche //SteelResearchInternational, vol. 89, no. 5, Article ID 1700350. – 2018.
3. Liu X. L., Cao J. G., Chaietal X. T. Experimental and numerical prediction of the local thickness reduction defect of complex cross-sectional steel in cold roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 95, no. 5–8, pp. 1837–1848.
4. Abeyrathna B., B. Rolfe, P. Hodgson, Weiss M. Local deformation in rollforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 88, no. 9–12, pp. 2405–2415.
5. Halmos T. Roll Forming Handbook / Edited by George T. Halmos Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583 p.
6. Corporate author. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, volume 2. SME, Dearborn, Michigan, 4 edition, 1984. 955 P.
7. Schulze G. Kenngrößen für die Entwicklung und den Einsatz von Profilmaschinen. *Maschinenbautechnik*, 1959, no. 8, pp. 181–191.
8. Kiuti M. Sovremennoe sostoyanie CAD/CAM v oblasti profilirovaniya v valkah. *Sosey to kako*, 1986. Tom 27. no. 300, pp. 184–192. Perevod s yap. no. B-100/3. Kiev: TPP USSR, 1987. 21 p.
9. Trishevskiy I. S., Doktorov M. E. *Teoreticheskie osnovyi protsessy profilirovaniya*. M.: Metallurgiya, 1980. 288 p.
10. H. Lundh, B. Carlsson, G. Engberg, L. Gustafsson, and R. Lidgren. *Formningshandboken-Stycksårarande bearbetning och plastiskformning*. SSAB Tunnpå AB, Borlänge, Sweden, 1 edition, 1997.
11. Filimonov A.V., Filimonov S. V. Forming diagrams and roll-passes in roll-forming of sections with middle rigidity elements. *Kalibrovchnoe byuro*. 2018, no. 12, pp. 34–40.
12. Ona H., Jimma T., Kozono H. A Computer Aided Design System for Cold Roll Forming, *Advanced Technology of Plasticity*. 1984. vol. 1, pp. 508–511.

Надійшло (received) 01.06.2020

Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

Чухліб Віталій Леонідович (Чухлеб Виталий Леонидович, Chukhlib Vitalij) – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Обробка металів тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: profdnepro@gmail.com.

Губський Сергій Олександрович (Губский Сергей Александрович, Gubskiy Sergii) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Обробка металів тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; тел.: (066) 219-20-50; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

Окунь Антон Олександрович (Окунь Антон Александрович, Anton Okun) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Обробка металів тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6467-4229>; тел.: (067) 578-63-17; e-mail: okunanton@gmail.com.