

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

УДК 620.179.1

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-16-22

ПРОГНОЗУВАННЯ ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТІВ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

О. І. Курандо, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: Yurii.Pliesnetsov@khpi.edu.ua*

Зростання споживання гнутих профілів, що спостерігається за останнє десятиліття у різних галузях виробництва та будівництва, вимагає пошуку нових технологічних рішень та застосування нових матеріалів, що забезпечують високу якість виробів за мінімальних витрат у процесі виробництва. Широке застосування профілів у будівництві (декоративні стінові та покрівельні панелі зовнішнього виконання, внутрішні декоративні панелі, силові несучі конструкції) зумовлює високі вимоги до їх захисно-декоративних властивостей, що досягається застосуванням відповідних покриттів. Гнуті сталеві профілі набули значного поширення в машинобудуванні та інших промислових галузях за останні роки. Вони слугують основою для різноманітних конструкцій — від простих огорож до складних механізмів і машин. Від їхньої якості залежить міцність, довговічність і безпека готових виробів. В даний час широке застосування знаходять процеси безпосереднього виготовлення профілів з листового матеріалу, який має багатшарове покриття, що вже нанесене у промислових умовах. Таке покриття має високі характеристики міцності, широку кольорову гаму і відмінну корозійну стійкість. Виготовлення профілю з такого матеріалу є більш ефективним, ніж нанесення покриття на вже готовий профіль. Інтенсифікація формоутворення дозволяє зменшити кількість технологічних переходів, забезпечити здешевлення обладнання, підвищити його мобільність, компактність, економічність, знизити витрати на площі, яке воно займає, зменшити час переналагодження та ін. Отже, важливо знати, яким чином визначати якість гнутих профілів перед їх використанням. До основних переваг гнутих профілів відносяться: необмежений асортимент поперечних перетинів гнутих профілів, що отримуються профілюванням; висока продуктивність виробництва; можливість деформаційного зміцнення матеріалу, яке обумовлено особливостями процесу профілювання. Разом з перевагами, мають місце досить високі витрати через наявність браку. Ці обставини потребують аналізу причин, які можуть призвести до виникнення дефектів гнутих профілів. У роботі представлена класифікація дефектів гнутих профілів та перелік можливих причин їх виникнення, що є важливим та актуальним завданням щодо аналізу технологічних процесів виробництва гнутих профілів та забезпечення контролю їх якості.

Ключові слова: дефекти, класифікація, якість, асортимент, матеріали, покриття, неруйнівний контроль, вимірювання, властивості матеріалів.

The increase in the consumption of bent profiles, which has been observed in the last decade in various industries of production and construction, leads to the search for new technological solutions and the use of new materials that ensure high quality of products at minimal production costs. The wide use of profiles in construction (decorative wall and roof panels of external execution, internal decorative panels, power-bearing structures) leads to high requirements for their protective and decorative properties, which is achieved by the use of appropriate coatings. Bent steel profiles are increasingly used in machine building and other industries in recent years. They are used as a basis for various structures, from simple fences to complex machines and mechanisms. The quality of these profiles directly affects the strength, durability and safety of structures. In our time, the processes of direct production of profiles from sheet material, which has a multi-layer coating, which has already been applied in industrial conditions, are widely used. This coating has high strength characteristics, a wide range of colors and excellent corrosion resistance. Making a profile from such material is more effective than applying a coating to an already finished profile. The intensification of molding makes it possible to reduce the number of technological transitions, ensure the equipment becomes cheaper, increase its mobility, compactness, economy, reduce the cost of the space it occupies, reduce the time of reconfiguration, etc. Therefore, it is important to know how to determine the quality of bent profiles before using them. The main advantages of bent profiles include: an unlimited range of cross-sections of bent profiles obtained by profiling; high production productivity; the possibility of deformation

hardening of the material, which is due to the features of the profiling process. Along with the advantages, there are quite high costs that arise as a result of the defect. These circumstances require an analysis of the reasons that can lead to defects in bent profiles. The study presents a classification of defects in bent profiles and a list of potential causes for their occurrence, which represents an important and relevant task for analyzing the technological processes involved in the production of bent profiles and ensuring their quality control.

Keywords: defects, classification, quality, assortment, materials, coating, non-destructive testing, measurement, material properties.

Вступ

На сьогоднішній день у технічних системах застосовують більше 250 типорозмірів спеціальних гнутих профілів. Перетини найбільш вживаних із них, наведені у табл. 1 та табл. 2.

У вагонобудуванні гнуті профілі дозволяють отримувати нові конструктивні рішення щодо окремих вузлів та елементів вагонів. У конструкції чотиривісних суцільнометалевих вагонів близько 25% його маси складають гнуті профілі, які дозволяють створити напіввагон з високими експлуатаційними якостями та сучасним зовнішнім виглядом.

Класифікація дефектів гнутих профілів

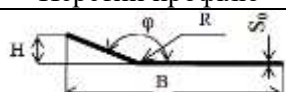
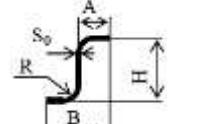
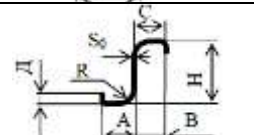
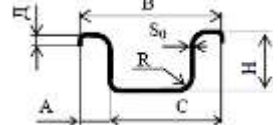
Дефекти просторової форми виникають через порушення режимів та схем формоутворення [1-8].

Прогин у вертикальній площині (повздовжній прогин) профілю може спричинити: помилки у виборі діаметрів

формуєвих валків; неправильне положення осі профілювання у вертикальній площині; нерівномірний зазор калібру валків; відхилення ширини заготовки; невірне налаштування правильного пристрою. Цей різновид дефектів спостерігається на профілях практично всіх типорозмірів, що пов'язано з різницею поздовжніх деформацій полиць, які підгинаються, та стінки профілю внаслідок порушення режимів і схем формоутворення.

Прогинання профілю у горизонтальній площині (шаблеподібність) відбувається з наступних причин: неправильне положення осі профілювання в горизонтальній площині; нерівномірний зазор у валках профілезгинального стану; бічне зміщення заготовки на попередніх переходах; шаблеподібність вихідної заготовки (більше 3 мм/м); помилкова схема формоутворення несиметричного профілю, або неправильне налаштування.

Таблиця 1 – Спеціальні гнуті профілі

№	Перетин профілю	A	B	C	Д	H	R	S ₀
1		80-135	10-43	-	-	15-98	1,6-6,4	0,5-3,2
2		8-52	25-92	-	-	7-77	1,5-5,6	0,3-0,8
3		13-17	25-120	10-45	4-13	13-100	1,0-8,6	0,5-2,3
4		6-25	36-126	16-48	4-22	22-64	2,3-7,1	0,6-2,6
5		1-13	8-35	-	-	10-22	4-11	0,5-1,3

**Таблиця 2 – Гнуті профілі
з відбортуннями, що застосовуються
у машинобудуванні**

№	Перетин профілю	Найменування	Застосування
1		Спеціальний кутик	Окантування, силові елементи
2		Спеціальний С-подібний	Лінії телефонного зв'язку
3		Спеціальний профіль	Лінії телефонного зв'язку
4		Спеціальний профіль	Теплиці
5		Спеціальний профіль	Автомобілебудування
6		Спеціальний профіль	Автомобілебудування
7		Корито-подібний	Автомобілебудування

Скручування профілю може відбуватися через: помилки у виборі схем формування; зміщення осі профілювання; нерівномірності зазору в валкових калібрах; відхилень параметрів заготовки (шаблеподібність, різнотовщинність, використання закритих роликів калібрів); неправильне налаштування правильного блоку.

Найбільшому скручуванню піддаються несиметричні профілі, хоча в більшості випадків скручування може бути усунуте відповідним налаштуванням правильного пристрою. Усунення скручування рідше призводить до втрати стійкості периферійних елементів профілю, ніж запобігання повздовжньому прогину профілю за допомогою правильного пристрою. Скручування є наслідком незбалансованості

деформаційних характеристик полиць, що підгинаються. У профілюванні попередження скручування профілів частково досягається за рахунок: підгинання полиць на різні кути; комбінації підгинання та розгинання меншої за шириною полиці; повороту перетину профілю відносно осі профілювання.

Відхилення розмірів перетину профілю від номінальних розмірів проявляється у: недоформуванні профілю по висоті; відхиленнях по ширині полиці; пружиненні та відхиленнях у місцях згинання.

Недоформування профілю по висоті пов'язане із: заниженою шириною вихідної заготовки; нерівномірним зазором; розкриттям валкового калібру.

Відхилення по ширині профілю часто відбуваються через зміну кривизни місця згинання в процесі деформування, що пов'язано з пружними деформаціями. При розвантаженні (виході профілю з калібру чергової пари валків) профіль розширюється навіть за відсутності значних відхилень кутів у місцях згинання. При стисненому згинанні пружинення може бути також від'ємним через осадження заготовки в замкненому калібрі.

Різнотовщинність – зміна товщини матеріалу профілю, обумовлене нестабільними умовами профілювання. Так, при гарячому прокатуванні різнотовщинність найчастіше викликається зміною зазору між валками та коливанням зусиль прокатування. Різнотовщинність також може стати наслідком незадовільної якості профілюючих валків.

Втрата стійкості елементів гнутого профілю регламентується відповідними нормативними документами, оскільки є причиною, що перешкоджає скороченню числа переходів.

Лінії Чернова-Людерса – це сліди площин ковзання, що виходять на поверхні вихідної заготовки. Дефекти псують зовнішній вигляд гнутих профілів,

зменшують точність їх розмірів, що призводить до браку.

Кромкова хвилястість – неплоскостинність у вигляді чергування гребнів і западин, що утворюються внаслідок нерівномірного витягування металу по довжині та ширині штаби або листа. Це дефект найчастіше виникає при виготовленні тонкостінних широкополічних гнутих профілів. При високій жорсткості полиць, що підгинаються, може мати місце, як кромкова хвилястість, так і злам полиці. Злами полиць утворюються при виникненні місцевої пластичної деформації внаслідок різких перегинів і є невідправним браком профілю.

Дефекти гнутих профілів, пов'язані з руйнуванням

Дефекти поверхні гнутих профілів проявляються у вигляді: задирок; подряпин; руйнування покриття.

Причиною задирок і подряпин можуть бути: жорсткі схеми формоутворення (велика контактна напруга); незадовільна якість поверхні формувальних валків; нерівномірний зазор в калібрі робочих валків; надмірна ширина заготовки при виготовленні профілю в закритих калібрах. При виготовленні сталевих тонкостінних профілів без покриття проблем, пов'язаних із зазначеними поверхневими дефектами, зазвичай не виникає.

Такий дефект, як нерівномірне деформаційне зміцнення, пов'язаний із зміною механічних властивостей матеріалу заготовки та зазвичай супроводжується зниженням пластичності окремих її ділянок. Цей дефект є результатом: різних обтискань з боків вихідної заготовки; різнотовщинності; нерівномірного нагрівання по ширині заготовки та ін.

При несприятливому впливі на механічні властивості металу (порушенні вимог при термообробці) може виникати крупнозернистість.

При високій жорсткості полиць, що підгинаються може мати місце, як хвилястість кромки, так і злам полиці

(рис. 1, а). Злами утворюються при місцевій пластичній деформації внаслідок різких перегинів і є невідправним браком профілю.

Зминання (рис. 1, б) можна віднести до браку профілю. Найчастіше воно виникає при контакті заготовки із буртом валка. Причиною дрібних складок на внутрішній поверхні (рис. 1, в) є несприятливе поєднання силових факторів, нерівномірний зазор валкового калібру.

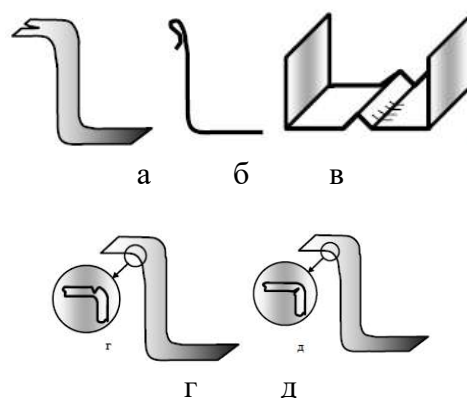


Рисунок 1 – Дефекти гнутих профілів:
 а – злам полиці, б – зминання, в – дрібні складки,
 г – руйнування зовнішнього контуру,
 д – затискачі

Найбільш серйозними дефектами гнутих профілів є дефекти, пов'язані з руйнуванням. Тріщини (руйнування зовнішнього контуру) (рис. 1, г) виникають у місцях вигину на зовнішній поверхні і найчастіше призводять до остаточного відбракування прокату. Причини тріщиноутворення: недостатня пластичність металу та дефекти його мікроструктури; малі радіуси згинання під час профілювання; наявність рисок або глибоких подряпин, що збігаються із зовнішньою поверхнею місця згинання.

Тріщини найчастіше спостерігаються при профілюванні заготовок з матеріалів, що важко деформуються. Затискачі (рис. 1, д) виявляються у вигляді потовщень на внутрішньому контурі при згинанні і найчастіше виникають у результаті нерівномірної деформації смуги у поперечному напрямку.

Матеріали, що застосовуються для виробництва гнутих профілів

Матеріалами для виготовлення гнутих профілів служать низьковуглецеві та леговані сталі, кольорові метали та інші сплави. Крім того, можуть бути використані плаковані або біметалеві матеріали.

Матеріал, що обирається для виготовлення гнутих профілів, не повинен мати структуру вільного цементиту та різко виражену межу плинності, оскільки можлива поява тріщин у місцях згинання штаб, та поява брижів на поверхні готового профілю.

Матеріали, що застосовуються для виготовлення гнутих профілів у різних сферах, варіюються від рулонних сталей звичайної якості до кольорових металів, сплавів з різними типами покриттів і композитів.

Матеріали без покриття

Невибагливими у технологічному відношенні є низьковуглецеві сталі, де вплив вуглецю визначається його структурою. Невеликі кількості розрізнених зерен цементиту та пластинчастого перліту не погіршують пластичних властивостей, у той час як наявність сітки структурно-вільного цементиту може різко знизити пластичність сталі, встановлену за ГОСТ 9045. Бал сітки повинен дорівнювати 2-3. Параметри твердості сталі істотно залежать від вмісту азоту (чим більше азоту, тим більша твердість). Деформованість у першому наближенні оцінюється відношенням межі плинності (σ_T) до межі міцності (σ_B). Рекомендовані значення (σ_T/σ_B) матеріалів для профілювання складають 0,55-0,60, або визначаються величиною відносного видовження δ_5 .

Для виробництва гнутих профілів найчастіше застосовуються сталі марок: Ст. 2, Ст. 3, Ст. 4, Ст. 5, Ст. 6 (спокійні або киплячі), сталь 08 кп, сталь 10 кп, сталь 08Ю, сталь 09Г2, для яких склад, механічні характеристики, види постачання та

відповідні стандарти вказані в довідниках. В наведених марках сталей відносно видовження перевищує 20%.

Високоміцні алюмінієві сплави (В95, В93, 01420) і магнієві сплави (МА2-1, МА8), що деформуються, мають відносно видовження від 7% до 12%, алюмінієві сплави (АМцМ, АМг2М–Амг6М), що деформуються – 20%.

У титанових сплавів (ОТ4, ВТ5) величина відносного видовження розташовується у діапазоні від 10% до 15%.

Зазначені вище групи матеріалів мають до того ж істотну анізотропію властивостей, яка впливає не тільки на характеристики пластичності, але і на силові параметри процесу.

Матеріали з металевим покриттям

В авіаційній промисловості широко застосовують плаковані алюмінієві сплави для виготовлення елементів фюзеляжу літального апарату. Чистий алюміній застосовується для плакування авіаційних сплавів, що деформуються. Сплав алюмінію з 1% цинку застосовується для міцних сплавів (В95). При використанні стисненого згинання для гнутих профілів малої висоти виникає порушення плакуючого покриття поблизу торців. Спостерігаються також дефекти, викликані значними контактними напругами, а також стискаючими напругами на внутрішньому контурі зони згинання. Зазначені дефекти пов'язані також з різницею механічних властивостей основного матеріалу та плакуючого шару.

Для захисту металу від корозії для металевих покриттів сталевих стрічки найчастіше застосовують цинк. Нанесення металевих покриттів на основі цинку певної товщини здійснюють гарячим або електролітичним способом. Оцинкована сталь, отримана з гарячого розплаву, має кращі захисні властивості, а покриття забезпечує значну адгезію і міцність у порівнянні з електролітичною сталлю. Саме тому близько 70% поверхонь цинкують з розплавів.

При формоутворенні порушення поверхні оцинкованої заготовки спостерігається при великих контактних напругах, а налипання (перенесення покриття на формуючі валки) – у разі незадовільної якості покриття вихідної заготовки. За умов, що передують втраті стійкості, на елементах профілю з'являються лінії Чернова-Людерса, які погіршують споживчі якості.

Матеріали з органічним покриттям

Для захисту металів від корозії частіше застосовуються органічні покриття. Вибір покриття повинен задовольняти таким вимогам: мала тривалість формування та сушіння покриття; високі фізико-механічні та декоративні властивості; достатня корозійна стійкість; стійкість до подальшої переробки матеріалу.

Зазначеним вимогам задовольняють покриття, що наносяться на рулонний матеріал, які можна поділити на: термореактивні; термопластичні, що одержуються з рідкої фази; полімерні плівки.

В наш час практично всі лакофарбові матеріали, для фарбування листового та рулонного матеріалів, виробляють на основі синтетичних олігомерів та полімерів, що поділяються на три групи:

1) термореактивні покриття (акрилові, поліефірні (ПЕ), епоксидні (ЕП));

2) термопластичні покриття (полівінілхлоридні пластизолі (ПЛ) та органозолі, а також кополімери вінілхлориду);

3) плівки (на основі полівінілхлориду (ПВХ), поліефірні матеріали, поліпропілен.

З багатьох характеристик полімерних матеріалів для процесів профілювання найбільший інтерес викликають характеристики кінцевого напівфабрикату (листа або стрічки). З вимог профілювання найважливішим серед фізико-механічних властивостей покриття є його еластичність, що дозволяє здійснювати згинання заготовки. Покриття покращують деформаційну здатність металу, зокрема,

за рахунок зниження тертя заготовки до поверхні інструменту, що дає можливість досягти значних ступенів деформації.

Для оцінки технологічності виготовлення того чи іншого профілю характеристики покриття повинні обов'язково братися до уваги.

Висновки

1. У роботі представлена класифікація дефектів гнутих профілів та перелік можливих причин їх виникнення.

2. Встановлено, що матеріалом для виготовлення гнутих профілів служать маловуглецеві та леговані сталі, кольорові метали та різні сплави, плаковані або біметалеві матеріали фарбовані, оцинковані та ін.

3. Для захисту основного металу сталевій стрічці від корозії найчастіше застосовують цинк. Нанесення металевих покриттів на основі цинку певної товщини здійснюють гарячим або електролітичним способом.

4. Оцинкована сталь, отримана з гарячого розплаву, має кращі захисні властивості (покриття має кращу адгезію і міцність) у порівнянні з електролітичною сталлю, тому близько 70% поверхонь цинкують з розплавів.

5. Покриття суттєво покращують деформаційну здатність металу за рахунок зниження тертя заготовки по поверхні інструменту, що надає можливість досягнення великих ступенів деформації.

Список використаних джерел / References

1. Erfani Moghadam A. Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles. Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, *Institute for Frontier Materials Deakin University*, 2017. 159 p.

2. Halmos T. Roll Forming Handbook. Edited by George T. Halmos Boca Raton: Taylor&Francis. 2006. 583 p.

3. Zhao W. Finite element analysis and fracture forecast of U channel flexible roll forming. *Adv Mat Res.* 683. 2013. P. 604-607.

4. Kasaei M.M., Moslemi Naeini H., Liaghat G.H. Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design.* Vol. 50(7). 2015. P. 529-541.

5. Halmos T. Roll Forming Handbook. Boca Raton: Taylor&Francis. 2006. 583 p.

6. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties. *Steel Research International.* 2018. Vol. 89, No. 5.

7. Halmos T. Roll Forming Handbook. Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583p.

8. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in rollforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2017. Vol. 88, No. 9–12. P. 2405-2415.

PREDICTION OF DEFECT APPEARANCE IN ROLLED SHAPES

O. I. Kurando, Yu.O. Pliesnetsov,
S. Yu. Pliesnetsov

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute";
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine;
e-mail: serhii.pliesnetsov@khpi.edu.ua