

Тришевський О.І.,
Чавикін М.М.,
Автухов А.К.
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail: 3shev@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ
КОРИТОПОДІБНИХ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ
ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ

<https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.86-97>

УДК 621.771.63

Тришевський О.І., Чавикін М.М., Автухов А.К. **Особливості технології виготовлення коритоподібних гнутих профілів підвищеної міцності.**

Анотація. Останнім часом підприємствами електротехнічної промисловості дедалі частіше використовуються різні деталі та профілі, виготовлені з електротехнічної листової релейної високоміцної сталі з поліпшеними службовими властивостями. Відомі схеми формування, прийняті для розробки технологій виробництва коритоподібних профілів зі сталей рядових марок при використанні їх для виготовлення аналогічних профілів з високоміцних сталей призводять до виникнення поверхневих дефектів, а також тріщин і розривів у місцях вигинів. Метою даної роботи було: розробка технології виробництва отримання якісних гнутих профілів коритоподібного перерізу з мало пластичних сталей підвищеної міцності з мінімальними радіусами місць згину з урахуванням деформованого стану металу під час профілювання. Розроблена нова схема формування, яка для компенсації напружень, що розтягують, у місцях формування, та призводять до порушень суцільності металу, забезпечує у калібрах валків на ділянках вигинів поперечне (тангенціальне) стиснення волокон металу в закритих калібрах валків, що запобігає руйнуванню профілю. Розроблені технологія та калібрування валків для формування коритоподібного профілю якоря реле $56,5 \times 8,5 \times 13,5 \times 1,8$ мм з мало-пластичної релейної сталі. Передбачається формування профілю в 10 клітках стану, з яких кліті з другої до шостої призначалися для отримання хвилястої заготовки; шоста - восьма - для її осадження в коритоподібний профіль; дев'ята - для запобігання поперечного прогину стінки профілю; десята - чистова. Для забезпечення поперечного стиснення заготовки калібри другої - восьмої клітей були закриті буртами нижніх валків. Розроблена технологія дає змогу одержувати якісні профілі з відносними радіусами кривизни $\bar{\rho} > 1$ з релейної сталі з гранично низькими пластичними властивостями ($\delta_{10} = 3-5\%$).

Ключові слова: гнутий профіль, коритоподібний переріз, деформований стан, радіус згину, тріщина, механічні властивості, схема формування, калібрування валків.

Trishevsky O.I., Chavykin M.M., Avtuhov A.K. **Features of technology of manufacturing trough-shaped bent profiles of increased strength.**

Abstract. Recently, enterprises of the electrical industry have been increasingly using various parts and profiles made of electrical relay high-strength steel sheets with improved service properties. The known forming schemes adopted for the development of technologies for the production of trough-shaped profiles from ordinary steel grades, when used to manufacture similar profiles from high-strength steels, lead to surface defects, as well as cracks

and tears in the bending areas. The aim of this work was to develop a production technology for producing high-quality bent profiles of trough cross-section from low ductility steels of increased strength with minimum bending radii, taking into account the deformed state of the metal during profiling. A new forming scheme has been developed to compensate for tensile stresses in the forming areas that lead to metal continuity disruptions, and to provide transverse (tangential) compression of metal fibers in closed roll gauges at bending areas, which prevents profile destruction. The technology and calibration of rolls for forming a trough-shaped profile of a 56.5×8.5×13.5×1.8 mm relay armature from low-plasticity relay steel have been developed. The profile is supposed to be formed in 10 stands of the mill, of which stands from the second to the sixth were intended to produce a wavy billet; the sixth to eighth stands were used to settle the billet into a trough-shaped profile; the ninth stand was used to prevent transverse deflection of the profile wall; and the tenth stand was used for finishing. To ensure transverse compression of the billet, the gauges of the second through eighth stands were closed with the bottom rolls. The developed technology makes it possible to produce high-quality profiles with relative radii of curvature $\bar{\rho} > 1$ from relay steel with extremely low plastic properties ($\delta_{10} = 3-5\%$).

Key words: bent profile, trough section, deformed state, bending radius, crack, mechanical properties, forming scheme, roll calibration.

Постановка проблеми

Нині в різних галузях промисловості, таких, як, наприклад, сільськогосподарське машинобудування, автомобілебудування, будівництво, авіаційна промисловість дедалі більше застосування знаходять вироби у вигляді тонкостінних профілів різного перерізу. Основними перевагами таких виробів є висока міцність і жорсткість за незначної ваги. Процеси виготовлення профілів дають змогу раціонально розподілити метал за перерізом і створити такі форми перерізів, які максимально відповідають умовам їхньої подальшої експлуатації. Це дає змогу створювати нові, легші та досконаліші конструкції, а також окремі їхні елементи, що складаються з одного гнутого профілю замість кількох гарячекатаних, з'єднаних зварюванням, клепокою або болтами.

Найбільш універсальним і широко застосовуваним процесом отримання тонкостінних профілів різноманітної конфігурації є високопродуктивний процес виробництва їх зі листової заготовки у валках методами профілювання. Гнуті профілі різних типів у великих обсягах виробляються на різноманітних профілезгинальних станах, встановлених як на металургійних комбінатах, так і на машинобудівних заводах, а також на спеціалізованих виробництвах приватних фірм і компаній.

Водночас на сьогоднішній момент багато питань профілювання листового металу на профілезгинальних станах загалом ще недостатньо вивчені. Так, немає теоретично обґрунтованих методик розрахунків технологічних процесів профілювання, які дали б змогу з достатнім ступенем точності визначити оптимальний режим профілювання, параметри напружено-деформованого стану металу під час формозміни, енергетичні параметри профілювання тощо. Це призводить до значних енергетичних втрат, завищення потужності та займаних площ під обладнання.

Виготовлення гнутих профілів зі сталей підвищеної міцності з мінімальними радіусами вигину також вимагає проведення додаткових досліджень технологічних процесів виробництва подібної продукції.

Ця робота присвячена питанням удосконалення технології виробництва та підвищення якості гнутих профілів, вироблених зі сталей підвищеної міцності, а отже, зниженої пластичності з мінімальними радіусами вигину, а тому є своєчасною та актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Процес профілювання на профілезгинальних станах полягає в послідовній зміні форми поперечного перерізу полоси під час проходження її через низку горизонтальних і непривідних вертикальних валків, що обертаються назустріч один одному (рис. 1).

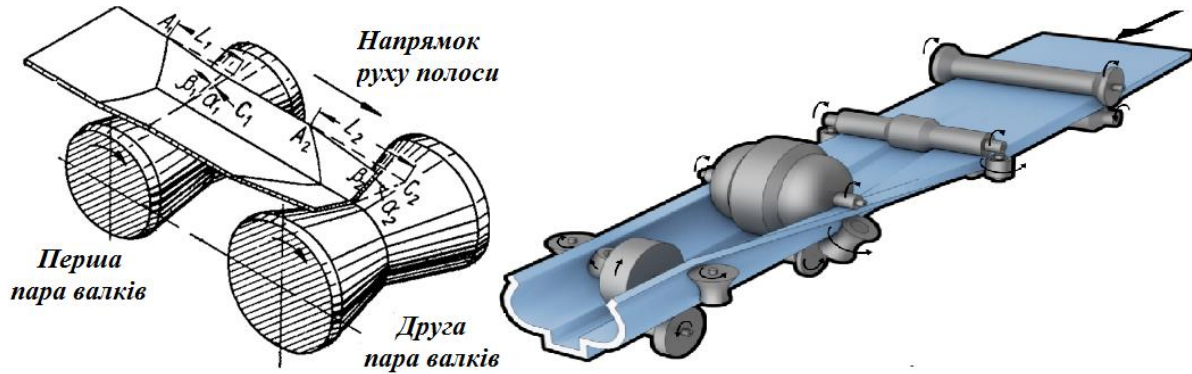


Рис. 1. Схеми формування гнутих профілів у валках

При цьому відбувається деформація вигину металу в холодному стані. Отримання профілю складної форми забезпечується шляхом поступового підгинання частин полоси в кожній парі валків.

Сортамент гнутих профілів, що випускається, складається із сортових, листових гофрованих і профілів спеціального призначення, що мають різноманітну форму поперечного перерізу.

З них найбільш поширеною групою як за сортаментом виготовлюваних профілів, кількістю їх типорозмірів та і за сумарним тонажем випуску є сортові гнуті профілі (рис. 2): куточки рівнополочні та нерівнополочні, швелери рівнополочні та нерівнополочні, швелери перфоровані, коритоподібні, зетоподібні, С-подібні, замкнені незварні та зварні профілі.

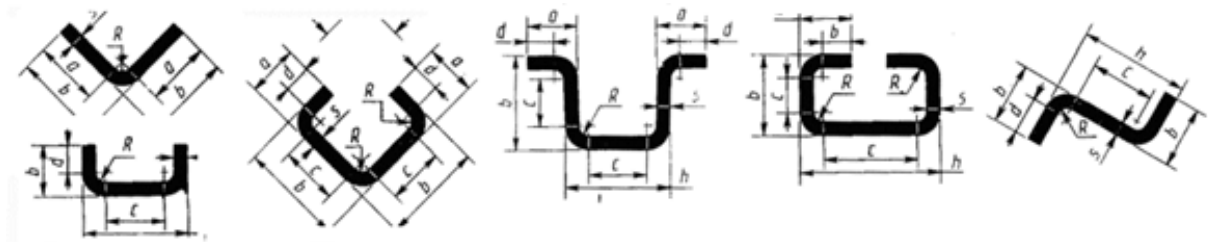


Рис. 2. Окремі види сортових гнутих профілів

Незважаючи на широке застосування в різних галузях промисловості сортових гнутих профілів (зокрема й профілів коритоподібного типу), які є одними з основних конструкційних елементів металоконструкцій, а також велику кількість опублікованих результатів як теоретичних, так і експериментальних досліджень технологій виробництва різних типів гнутих профілів, деякі закономірності поведінки металу під час профілювання в калібрах коритоподібних профілів вивчено недостатньо.

Наприклад, у роботах [1, 2] досліджено процес профілювання сортових профілів у валках профілезгинального стану. Показано, що під час деформації площина торця полоси відхиляється на деякий кут, протилежний напрямку профілювання. Результати проведених досліджень дали змогу запропонувати нову методику визначення максимально допустимого кута підгинання профілю з умов прослизання полоси у валках

або стійкості переднього кінця. Однак, проведені дослідження стосувалися профілювання лише профілів типу куточок і швелер, в той час як профілі коритоподібного типу мають свої, відмінні особливості профілювання. Крім того, дослідження, що стосуються профілювання з мало-пластичних, високоміцних сталей з мінімальними радіусами вигину, в роботі на виконувалися.

У роботі [3] розглядається технологія виробництва спеціального замкнутого профілю з внутрішньою перегородкою зі сталі підвищеної міцності. За допомогою системи ABAQUS проведено скінчено-елементне моделювання та порівняльні експерименти для вивчення закону формоутворення спеціального профілю для проектування переходів, під час виробництва замкнутого трубного профілю з поперечною перегородкою. Виконані дослідження дали змогу підвищити коефіцієнт використання матеріалу за рахунок оптимізації числа переходів (клітей) за розробленою технологією. Однак, значна відмінність конфігурації досліджуваного профілю від коритоподібного, зовсім інші режими формоутворення (рис. 3), не дають змоги використовувати результати цієї роботи під час вдосконалення технології профілювання коритоподібного профілю з високоміцних сталей. Необхідно зазначити, що питання отримання мінімальних радіусів на місцях внутрішніх заокруглень профілю, в роботі не розглядалися.

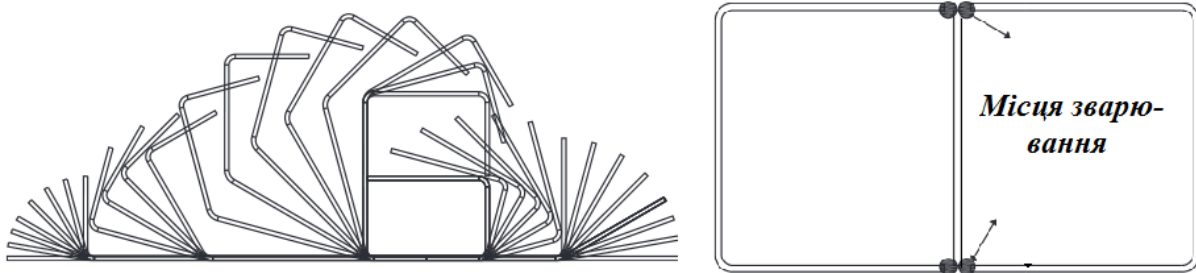


Рис. 3. Спеціальний замкнений профіль та режим його формування

Певний інтерес представляє робота [4], в якій автори з використанням методу опору матеріалів пластичному деформуванню визначили компоненти напружено-деформованого стану металу під час формування рифлень на елементах профілів з поверхнею протиковзання. Дослідження напружено-деформованого стану елементів профілів на різних етапах формоутворення є дуже важливими для правильного визначення граничних можливостей формоутворення, а, отже, і для вдосконалення цих процесів. Крім того, технологічний прийом осаджування перерізу профілю в процесі формування в низці випадків може бути використаний для поліпшення якості продукції шляхом примусового поперечного стиснення металу, що дає можливість зменшення внутрішніх радіусів вигину. Однак у вданому випадку проводиться періодичне осаджування до вихідної площини попередньо відформованих наскрізних поздовжніх гофрів з метою отримання періодично повторюваних невисоких гофрів, що абсолютно не відповідає схемам формування сортових профілів. Крім того, незрозуміло, куди дівається надлишок металу, що утворився на попередньо відформованому гофрі, після його осаджування до площини.

Поряд з постійним розвитком і розширенням сортаменту вироблених гнутих профілів перед виробничниками гостро стоять питання підвищення якості продукції, що випускається. Причому підвищення якості не тільки за рахунок поліпшення геометрії і точності гнутих профілів, а й шляхом підвищення їхніх міцнісних характеристик, зокрема і за рахунок застосування нових марок сталі підвищеної міцності, що з'являються дедалі частіше, а також збільшення несучої здатності перерізів профілів за

рахунок максимально можливого зменшення радіусів вигину профілів у процесі профілювання.

При конструюванні клітьових роликів вузлів враховують пластичне деформування сталевих листів, адже надмірне згинання листа може призвести до порушення пружності та пластичності і руйнуванню виробу. Для забезпечення заданої форми необхідно на кожному етапі формування профілю враховувати як залишкові деформації металевих листів, так і напрямок прокатування під час його виготовлення та радіуси згинання в залежності від товщини заготовки тощо. При згинанні пластично деформується тільки ділянка заготовки в зоні її згинання і зовнішні шари розтягуються, а внутрішні стискаються. Під час знімання навантаження розтягнуті шари заготовки пружно стискаються, а стиснуті розтягуються, внаслідок чого змінюється кут між полицками профілю, тобто відбувається пружинення деталі, яке може зростати із збільшенням внутрішнього радіусу загибу та товщини листа. Це необхідно враховувати відповідною поправкою на кут гнуття. Із зменшенням радіуса заокруглення гнуття зростає ймовірність утворення тріщин, які ідуть від зовнішньої поверхні в товщину заготовки. Тому необхідно вибрати мінімальне значення радіуса згибу в залежності від виду металу і його пластичності.

Останнім часом у електротехнічній промисловості з'явилась необхідність виготовляти ряд профілів із сталі підвищеної міцності, таких як, наприклад, листові релейні сталі з полішеними службовими (магнітними) властивостями. Ці сталі вирізняються високими характеристиками міцності за гранично низьких пластичних: у стані постачання $\sigma_s = (6-8) \times 10^8$ Па, $\delta_{10} = 4-5\%$. (Сталь електротехнічна нелегована марок 20832, 20848, 20850 та ін.). Виготовляти вироби з такої сталі звичайними методами профілювання не є можливим, навіть за відносно великих радіусів кривизни на зовнішній поверхні з'являються мікро та макро- тріщини.

Водночас підприємствами електротехнічної промисловості дедалі частіше використовують різні деталі та профілі, виготовлені саме з електротехнічної, високоміцної сталі. Характерним прикладом таких деталей є профіль якоря реле з релейної сталі (рис. 4).

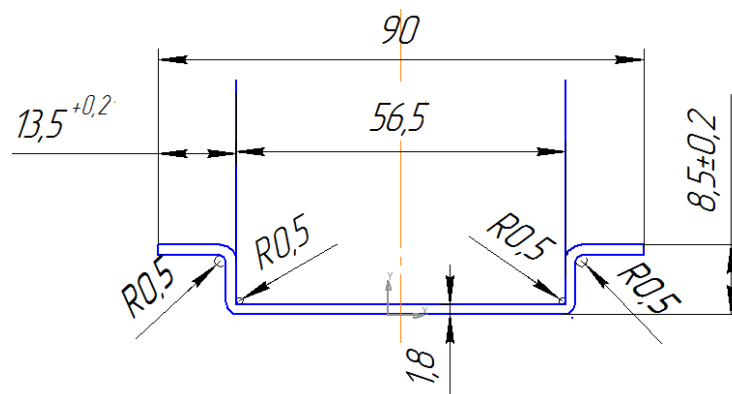


Рис. 4. Профіль якоря реле

Як видно з рис. 4, він являє собою спеціальний коритоподібний профіль $56,5 \times 8,5 \times 13,5 \times 13,5 \times 1,8$ мм, виготовлений з електротехнічної нелегрованої сталі 20848 завтовшки 1,8 мм, відмінними рисами якої є висока міцність матеріалу [$\sigma_s = (6-8) \times 10^8$ Па], його низька пластичність ($\delta_{10} = 4-5\%$). Крім того, профіль має критично малі радіуси місць вигину – $R=0,5$ мм. (Наприклад, мінімальні рекомендовані радіуси місць вигину під час профілювання зі звичайних вуглецевих сталей залежно від товщини становлять $R \geq (1 \div 1,5) S$, а для профілів із низьколегованої сталі – в межах $R \geq (2 \div 3,5) S$).

Технологія виготовлення коритоподібних гнутих профілів зі звичайних матеріалів, рекомендовані режими профілювання і системи калібрувань валків, які застосовують, давно відомі та наведені у відповідній літературі, наприклад, [5]. Приблизну схему формування подібних профілів наведено на рис. 5.

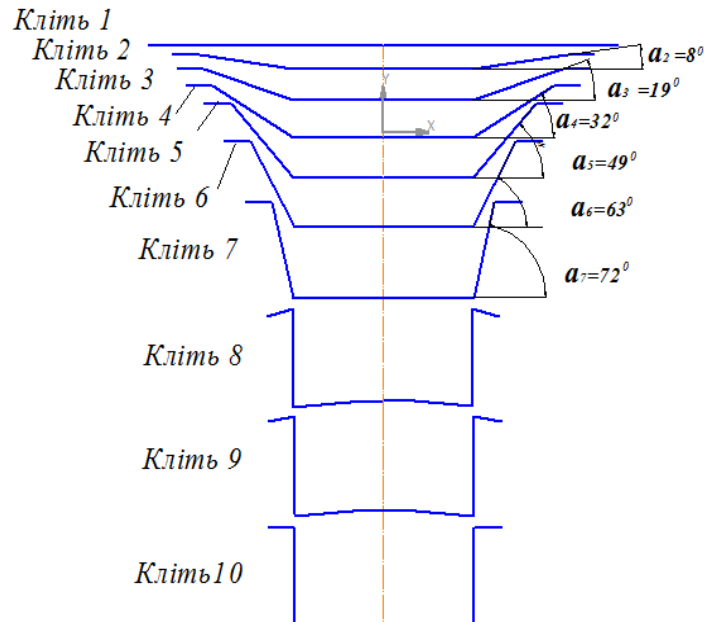


Рис. 5. Примірна схема формування коритоподібного профілю

Формоутворення коритоподібного гофра відбувається в 10 клітях відкритого типу за рахунок деформації вигину – розтягування (стиснення) в місцях підгинання. Розтягнутими є шари металу, розташовані вище нейтральної лінії профілювання, а стиснутими – розташовані нижче цієї лінії. Причому, безпосередньо формування коритоподібного перерізу відбувається в семи клітях стану (з другої по восьму). Перша кліть використовується для попереднього виправлення можливого поперечного прогину заготовки і завдання її в формувальні кліті. Восьма і дев'ята кліті в даному випадку використовуються для перегину горизонтальних полиць на $5 - 10^0$ від площини і використовуються для запобігання пружинення цих полиць. Десята кліть є калібрувальною.

Ця схема формування прийнятна для розробки технологій виробництва коритоподібних профілів зі сталей рядових марок. Розроблення ж за такою схемою технологій профілювання виробів з високоміцних і мало пластичних сталей, якою є і електротехнічна нелегована сталь 20848, призводить до виникнення поверхневих дефектів, а також тріщин і розривів у місцях вигинів.

Формулювання мети досліджень

Аналіз доступної науково-технічної літератури не виявив публікацій, що стосуються розроблення технологій освоєння та підвищення якості профілів коритоподібного типу з високоміцних, мало пластичних марок сталей з малими радіусами місць вигину.

Тому метою даної роботи було: розробка технології виробництва отримання якісних гнутих профілів коритоподібного перерізу з мало пластичних сталей підвищеної міцності з мінімальними радіусами місць згину з урахуванням деформованого стану металу під час профілювання.

Результати досліджень

Для запобігання утворенню вказаних вище дефектів необхідно розробити таку схему формування, яка для компенсації напружень, що розтягують, у місцях формування, та призводить до порушень суцільності металу, забезпечувала б у калібрах валків на ділянках вигинів поперечне (тангенціальне) стиснення волокон металу.

У зв'язку з цим розроблено нову технологію виробництва коритоподібних профілів, принциповою особливістю якої є підвищення пластичних властивостей металу в процесі профілювання і запобігання руйнуванню профілю в результаті всебічного стиснення заготовки в закритих калібрах валків.

У перших проходах (на першому етапі формування) передбачають формозміну полоси, ширина якої більша за ширину розгортання готового профілю в хвилясту заготовку з відносним радіусом хвиль не менше ніж 3-5 (рис. 6 а). Для підвищення пластичності металу і поліпшення якості поверхні профілю хвилясту заготовку обтискають за товщиною в межах пружних деформацій і водночас стискають у тангенціальному (поперечному) напрямі (зі зменшенням попередньо збільшеної за шириною розгортки профілю) в закритих калібрах.

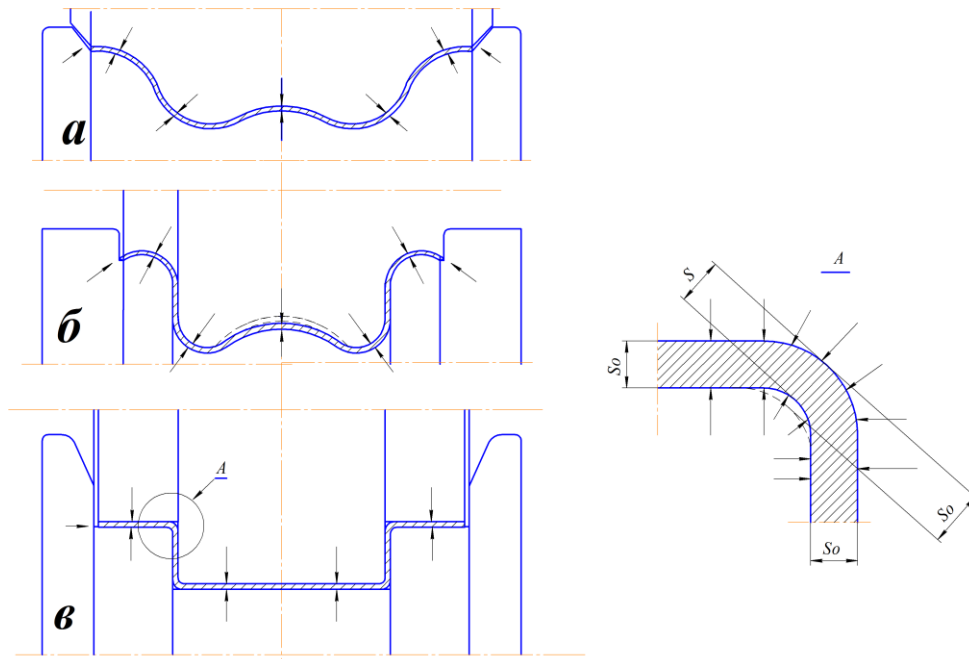


Рис. 6. Етапи профілювання коритоподібних профілів із сталей підвищеної міцності

У проміжних переходах (на другому етапі) забезпечується поперечне стиснення місця вигину (зі зменшенням ширини заготовки) в закритих калібрах і переміщення надлишку металу з попередньо зігнутої стінки профілю під час її випрямлення (рис. 6 б).

У передчистових і чистових переходах (на третьому етапі) хвиляста заготовка переформовується в коритоподібний профіль шляхом осідання з одночасним стисненням по всій ширині в закритих калібрах і обтисненням по товщині. Причому, місця вигину в чистових переходах обтискаються більшою мірою, ніж інші ділянки (рис. 6 в).

Для правильного проектування технології та розрахунку калібрувань валків, що дають змогу виготовляти коритоподібні профілі за запропонованою схемою, необхідно правильно розраховувати надлишок матеріалу за шириною заготовки, який надалі буде переформовуватися в закритих калібрах із витісненням надлишку металу в тангенціальному напрямку в зону формоутворення місць вигину з малими радіусами.

Для цього на основі основних положень механіки суцільних середовищ, теорій пружності та пластичності був проведений аналіз деформованого стану елементів профілю на різних етапах його формування, що дозволило розрахувати необхідні технологічні параметри та спроектувати нове калібрування валків, яке забезпечило виробництво коритоподібного профіля за запропонованою технологією (рис. 7).

Передбачалося формування профілю виконувати в 10 клітках стану, з яких кліті з другої до шостої призначалися для отримання хвилястої заготовки; шоста – восьма – для її осадження в коритоподібний профіль; дев'ята – для запобігання поперечному прогину стінки профілю; десята – чистова. Для забезпечення поперечного стиснення заготовки калібри другої – восьмої клітей були закриті буртами нижніх валків.

Ширину заготовки визначали з урахуванням її зміни в процесі формування.

$$V_{\text{розрах}} = V_{\text{розг}} + \Delta b_{\text{ст}} - \Delta b_{\text{s}} \quad (1)$$

де $V_{\text{розг}}$ – ширина розгортки профілю; $\Delta b_{\text{ст}}$ – зменшення ширини розгортки профілю в результаті поперечного стиснення заготовки; Δb_{s} – збільшення ширини заготовки під час обтиснення криволінійних ділянок за товщиною.

За умови $V_{\text{розг}} = 100,5$ мм – $V_{\text{розрах}} = 105$ мм. Дослідження впливу ступеня стиснення заготовки в закритих калібрах на якість профілю показало, що під час формування без поперечного стиснення ($V_{\text{заг}} < V_{\text{розрах}}$) профілі руйнувалися (рис. 8 а); у разі розрахункового стиснення вони мали потрібну якість (рис. 8 б, в).

Оскільки розроблений технологічний процес отримання профілів із мало-пластичних і високоміцних заготовок передбачає високу інтенсивність перебігу процесу формоутворення, стиснення й обтиснення заготовки, що формується, під час формоутворення малих радіусів, було виконано низку досліджень із визначення механічних властивостей отриманих профілів та енергосилових параметрів їхнього формування. Так, дослідження зміни мікроструктури та розподілу мікротвердості за товщиною профілю [6] підтвердили справедливості припущення, зробленого на підставі теоретичного аналізу: заготовка пластично деформується по всьому об'єму. Мікроструктура і мікротвердість змінюються нерівномірно - приріст мікротвердості був більшим на поверхнях заготовки та меншим на її середині, причому розподілявся приріст мікротвердості по перерізу темплету не симетрично. Максимальна величина мікротвердості – 140 HV була зафіксована на внутрішній поверхні криволінійних ділянок (рис. 10). На зовнішній поверхні радіусу згину профіля твердість складала 134 HV. Найменше підвищення величини мікротвердості по рівнянню з твердістю вихідного матеріалу – 130 HV було зафіксовано посередині товщини заготовки і складало 132 HV.

У перших проходах при формоутворенні хвилястої заготовки відбувалося дроблення крупних зерен по всій товщині, причому, більшою мірою - в серединних шарах, оскільки зерна поверхневих шарів мають більшу міцність унаслідок наклепу під час холодного плющення, а крім того, їхньому руйнуванню перешкоджає контактне тертя між валками та заготовкою. Під час осадження хвилястої заготовки та її обтиснення за товщиною з одночасним тангенціальним стисненням дробляться зерна і в поверхневих шарах, структура стає дрібнозернистою з приблизно однаковою величиною зерен за товщиною, що сприяє отриманню стабільних магнітних властивостей під час остаточного відпалу виробів.

Дослідження енергосилових параметрів формування профілю (зусиль і крутних моментів профілювання), проведені з використанням методів тензометрії [7] показали, що зі збільшенням кута підгинання і ступеня поперечного стиснення вони збільшуються. Максимальна величина зусиль у робочій клітці – 107,8 Кн (11т), крутних моментів – 13,2 нм (130 кгс м), а отже, розглянутий профіль можна виготовляти на промислових середньо-сортних профілезгинальних станах типу 1 – 4×50 – 300 підприємств різних галузей промисловості та форм власності.



Рис. 8. Місце згину стінки коритоподібного профілю виготовленого без поперечного стиснення та обтиснення по товщині (а), з поперечним стисненням (б) та зі стисненням та обтисненням по товщині (в)

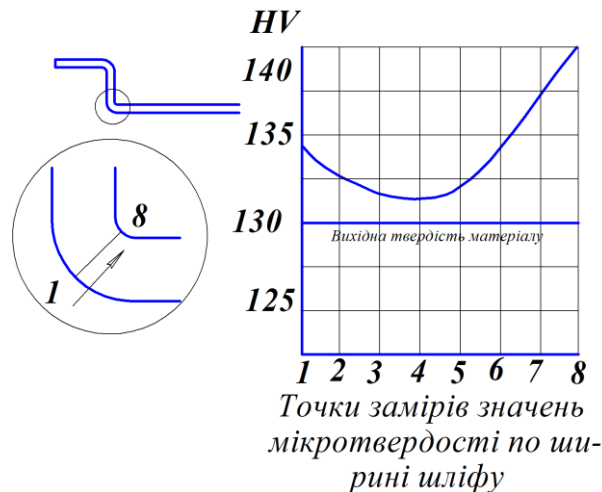


Рис. 10. Розподіл мікротвердості по товщині темплету в місті найбільшої деформації

Таким чином, застосування спеціальних схем і способів формування, досліджених у роботі, які забезпечують стиснення місць вигину профілів у калібрах валків, дає змогу одержувати якісні профілі з відносними радіусами кривизни $\rho^{-1} > 1$ з релейної сталі з гранично низькими пластичними властивостями ($\delta = 3-5\%$).

Результати досліджень можуть бути використані при виготовленні профілів з мало-пластичних марок сталей.

Висновки

1. Розроблено нову технологію виробництва коритоподібних профілів зі сталей підвищеної міцності принциповою особливістю якої є підвищення пластичних властивостей металу в процесі профілювання та запобігання руйнуванню профілю в результаті всебічного стиснення заготовки в закритих калібрах валків. Процес формування передбачає формоутворення коритоподібного профілю за три етапи.

2. На першому етапі формування передбачається формозміна полоси, ширина якої більша за ширину розгортки готового профілю, на хвилясту заготовку з відносним радіусом хвиль щонайменше 3-5. При цьому хвиляста заготовка обтискається по товщині в межах пружних деформацій і одночасно стискається в тангенціальному (поперечному) напрямку (зі зменшенням попередньо збільшеної по ширині розгортки профілю) в закритих калібрах. На другому етапі забезпечується поперечне стиснення місця вигину (зі зменшенням ширини заготовки) в закритих калібрах і переміщення надлишку металу з попередньо зігнутої стінки профілю під час її випрямлення. На третьому етапі хвиляста заготовка переформовується в коритоподібний профіль шляхом осадження з одночасним

стисненням по всій ширині в закритих калібрах і обтисненням по товщині. Причому, місця вигину в чистових переходах обтискаються більшою мірою, ніж інші ділянки.

3. Розроблене калібрування валків для формування коритоподібного профілю якоря реле 56,5×8,5×13,5×1,8 мм з мало-пластичної релейної сталі. Передбачається формування профілю в 10 клітках стану, з яких кліті з другої до шостої призначалися для отримання хвилястої заготовки; шоста – восьма – для її осадження в коритоподібний профіль; дев'ята – для запобігання поперечного прогину стінки профілю; десята – чистова. Для забезпечення поперечного стиснення заготовки калібри другої - восьмої клітей були закриті буртами нижніх валків.

Список використаних джерел

1. Тепин Н.В. Совершенствование технологии и оборудования для производства гнутых профилей. дис. канд. техн. наук. 05.03.05. Краматорск. 2006. 198 с.
2. Ершов С.В., Мельник С.Н., Геймур К.Г., Кравченко Е.А. Экспериментальное и теоретическое исследование деформированного состояния металла при прокатке швеллера. Вісник НТУ «ХПІ». Горячая проката. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 43 (1086). С. 31–39.
3. Jicai Liang, Chuandong Chen, Ce Liang, Yi Li, Guangyi Chen, Xiaoming Li, Aicheng Wang. One-time roll-forming technology for high-strength steel profiles with “E” section. *Advances in Materials Science and Engineering*. Volume 2019. Article ID 6505914. 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/6505914>.
4. Подзолкова Ю.А., Плеснецов Ю.А. Теоретический анализ напряжённно-деформированного состояния металла при валковой формовке упрочнённых гнутых профилей. Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 5 (1048). С. 60–65.
5. Докторов М.Е., Щеглов В.М., Пшеничная Н.В., Брыков К.С. Разработка и освоение технологии производства специальных гнутых профилей для шинопроводов. Тематический сборник трудов УкрНИИМета, «Гнутые профили проката» выпуск III. Харьков. 1975. С. 132–136.
6. Холявко В.В., Владимірський І.А., Жабинська О.О. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів. Навчальний посібник. Київ. ТОВ «Видавництво «Центр учбової літератури». 2011. 154 с.
7. Серета Б.П., Прицип М.Г., Кругляк І.В. Експериментальні дослідження процесів ОМТ. Навчально-методичний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Запоріжжя: ЗДІА, 2011. 170 с.

References

1. Tepin N.V. (2006). Improvement of technology and equipment for the production of bent profiles. Candidate of Technical Sciences. 05.03.05. Kramatorsk. 198 p.
2. Ershov S.V., Mel'nik S.N., Geymur K.G., Kravchenko E.A. (2014). Experimental and theoretical study of the deformed state of metal during channel rolling. *Bulletin of NTU "KhPI". Hot rolling*. Series: Innovative technologies and equipment for material processing in mechanical engineering and metallurgy - Kharkiv: NTU "KHPI". No. 43 (1086). P. 31–39.
3. Jicai Liang, Chuandong Chen, Ce Liang, Yi Li, Guangyi Chen, Xiaoming Li, Aicheng Wang. (2019). One-time roll-forming technology for high-strength steel profiles with “E” section. *Advances in Materials Science and Engineering*. Volume 2019. Article ID 6505914. 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/6505914>.
4. Podzolkova Y.A., Plesnetsov Y.A. (2014). Theoretical analysis of the stress-strain

state of metal during roll forming of hardened bent profiles. Bulletin of NTU "KhPI". No. 5 (1048). P. 60–65.

5. Doctorov M.E., Shcheglov V.M., Pshenychnaya N.V., Brykov K.S. (1975). Development and mastering of the technology of production of special bent profiles for busbars. Thematic collection of works of UkrNIIMet. "Bent profiles of rolled products". Issue III. Kharkiv. P. 132–136.

6. Kholiyavko V.V., Vladimirsky I.A., Zhabinskaya O.O. (2011). Physical properties and methods of materials research / Textbook for students of higher educational institutions. Kyiv. LLC "Publishing House "Center of Educational Literature". 154 p.

7. Sereda B.P., Pryshchyp M.G., Kruglyak I.V. (2011). Experimental studies of OMT processes. Study guide for students of higher educational institutions. Zaporizhzhia. ZDIA. 170 p.