

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.01

УДК 621.774

В.В. Бояркін, О.А. Ремез, О.С. Польща

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОФІЛЮВАННЯ ТРУБ КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Анотація. *Леговані манганом та бором сталі все ширше використовують в машинобудуванні, у тому числі авто- і сільськогосподарському. Вироби відповідального призначення з таких сталей, у тому числі порожнисті, мають високий рівень механічних властивостей, твердості поверхні та зносостійкості. Такі вироби отримують профілюванням попередньо електрозварних круглих труб гарячою листовою штамповкою або іншими видами обробки тиском (волочінням, холодною прокаткою, штампуванням). Технологічні параметри комбінованих процесів обробки часто визначають за допомогою результатів експериментальних досліджень, що з огляду на складність і вартість матеріалів призводить до значних витрат. Використання математичного моделювання дозволяє зменшити кількість експериментів та прогнозувати якість готових виробів. Дослідження присвячені перевірці можливості отримання квадратних труб прошовхуванням в одній клітці трубоелектрозварювального агрегату та визначенні вимог до геометричних параметрів заготовки.*

Ключові слова: *сталь, профілювання, обробка металів тиском, прошовхування, сила, формозміна.*

Вступ

Застосування профільних труб простого поперечного перерізу, у тому числі квадратних, полягає в різкому зниженні витрат металу на відходи при виготовленні заготовок, скороченні циклу обробки і витрат у споживачів, зменшенні парку метало-оброблюваного обладнання для забезпечення заданого обсягу виробництва заготовок, зниженні потреби при робочій силі в виробництвах металообробки [1-3]. Квадратні і прямокутні труби, у тому числі зі сталей, легованих бором, що встановлюються в різних конструкціях, мають велику в порівнянні з круглими несучу спроможність на одиницю маси, що

дозволяє отримати значну економію металу, знизити вагу заготовок, а також поліпшити умови зборки машин і конструкцій [4]. Граничні відхилення розмірів і допуски форми, а також граничні відхилення маси порожнистих профілів холодного формування не повинні перевищувати значення, наведені, наприклад, у вітчизняних стандартах [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наразі у виробництві використовується кілька способів формування і профілювання труб квадратного перерізу, що відрізняються характером течії металу, тому методики розрахунку параметрів робочого інструменту для цих способів також відрізняються.

Профілювання, тобто формозміна круглої трубної заготовки з утворенням необхідної профільної труби, може здійснюватися безперервно в лінії трубоелектрозварювального агрегату ТЕЗА (неперервне профілювання) або поза лінією на окремо встановленому обладнанні (поштучне профілювання). Поштучне профілювання проводять, як правило, волочінням або прокаткою на багатоклітьових безперервних станах, для поштучного виробництва труб також застосовують експандування.

Способи профілювання шляхом волочіння через волочильні кільця характеризуються низькою ефективністю, оскільки при їх використанні необхідно виконувати забивання головки, нанесення на заготовку підмастильного шару і змащення з подальшим його видаленням. До недоліків можна віднести також високу енергоємність і складність виготовлення волочильного інструменту з дорогих твердих сплавів. Основними недоліками способів профілювання шляхом волочіння через роликові волокни є велика витрата металу, викликана необхідністю забивання головки, а також низька продуктивність через багатоциклічність процесу [7, 8].

В даний час в Україні квадратні труби виробляються в лініях ТЕЗА на всіх основних трубних підприємствах. Для профілювання використовують декілька клітей калібруючого стану.

Теоретичними дослідженнями зміни форми поперечного перерізу при профілюванні показано, що можливе створення випуклості або увігнутості

сторін є результатом поступової зміни форми заготовки під впливом зовнішніх навантажень і не пов’язане із втратою стійкості. Такий підхід дозволив зробити дуже важливий для розробки технології та обладнання висновок: кількість профілюючих клітей (кількість проходів) не є визначаючою, з точки зору виготовлення труб без випуклості або увігнутості, тобто профільні труби з прямолінійними сторонами і малими зовнішніми радіусами їх сполучення можуть бути отримані і за один прохід в одній чотирьохвалковій кліті, валки якої мають відповідну калібровку [9].

Сили при прошовуванні трубної заготовки через чотирьохвалкову неприводну кліть будуть створювати задній осьовий підпір (осьове стискуєче напруження), який сприяє кращому заповненню калібру і створює більш сприятливі умови для зовнішніх радіусів сполучення сторін труби, а також полегшує умови захвату в порівнянні з кліттю з приводними валками. Такий спосіб забезпечує значну економію енергії, матеріалу робочого інструмента, часу на установку і зміну калібру, однак має і недоліки: внаслідок наявності заднього підпору можливе додаткове потовщення стінки, наявний метод розрахунку не дозволяє визначити величину сили прошовування, тому дослідження формозміни за допомогою сучасних методів комп’ютерного моделювання є актуальними.

Мета дослідження

Для вивчення механізму формозміни та енергосилових параметрів процесу було сформульовано такі задачі:

– провести теоретичне дослідження механізму появи випуклості (увігнутості) сторін профілю, стовщення стінки і сили профілювання в залежності від таких факторів, як матеріал і геометричні розміри заготовки, форма і розміри чотирьохвалкових калібрів;

– проаналізувати результати досліджень і одержати математичний опис залежності сили профілювання від матеріалу і геометричних розмірів заготовки;

– визначити залежності випуклості (увігнутості) сторін профілю та стовщення стінки від параметрів товстостінності заготовки.

Основні матеріали дослідження

Для теоретичного дослідження механізму формозміни використовувалась програма QForm [10]. QForm – поширений програмний комплекс для математичного моделювання різних процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів.

Для створення тривимірної моделі чотирьохвалкового калібру проведено розрахунки геометричних параметрів калібру за методиками, наведеними в роботах [2, 9].

Розрахунок значення радіусу увігнутості робочої поверхні профілювальних валків для прокатки квадратної труби:

$$R_n = \frac{E_K \cdot J \cdot l}{2 \cdot P_B \cdot r^2} + \sqrt{\left(\frac{E_K \cdot J \cdot l}{2 \cdot P_B \cdot r^2}\right)^2 + \frac{1}{r^2} \cdot \left[\left(\frac{E_K \cdot J}{P_B}\right) + \frac{l^4}{16}\right]},$$

де E_K – дотичний модуль пластичності, Па; J – момент інерції боку одиничної довжини уздовж осі труби, м⁴; P_B – вертикальна сила, яка діє на профілюючий валок, Н; l – сторона квадратної труби, м; r – радіус заокруглення в куті квадрату, м.

Вертикальна сила, що діє на профілюючий валок:

$$P_B = 0,5 \cdot \sigma_T \cdot S^2 \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_T}\right),$$

де σ_T – опір деформації, Па; R_T – радіус труби після калібрувальної групи клітей, м.

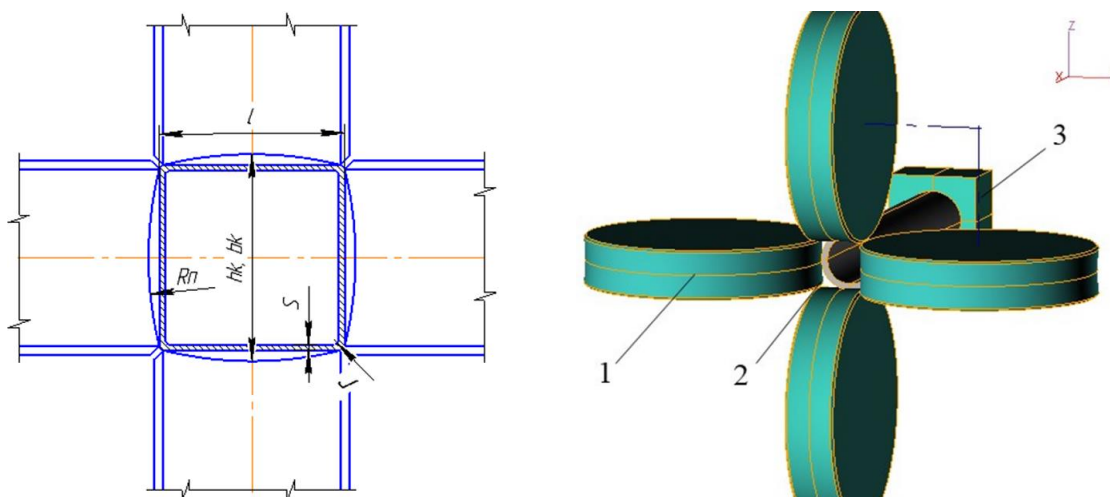
Глибина рівчака на валку представлена таким виразом:

$$h_a = R_n - \sqrt{R_n^2 - \frac{(1 - 2 \cdot r)^2}{4}}$$

Висота (ширина) калібру:

$$h_k = 1 + 2 \cdot h_a$$

Схема калібру наведена на рисунку 1. За результатами розрахунків були створені тривимірні моделі труби-заготовки, роликів та штовхача.



До розрахунку калібру

1 – ролики; 2 – заготовка; 3 – штовхач

Рисунок 1 – Схема чотирьохвалкового калібру

Для розрахунків були використані реологічні властивості сталі 19MnB4.

Сили тертя між заготовкою та інструментом при прокатці розраховувались по моделі Леванова, також був заданий коефіцієнт Леванова 1,25 і фактор тертя 0,5, що відповідає умовам прокатки без застосування змащувальних матеріалів.

Зовнішній діаметр заготовки – 20 мм, товщина стінки змінювалась від 0,5 до 3,5 мм з кроком 0,25 мм. Для кожного значення товстостінності заготовки отримувались дані щодо значення сили і фіксувалась максимальна величина (рис. 2).

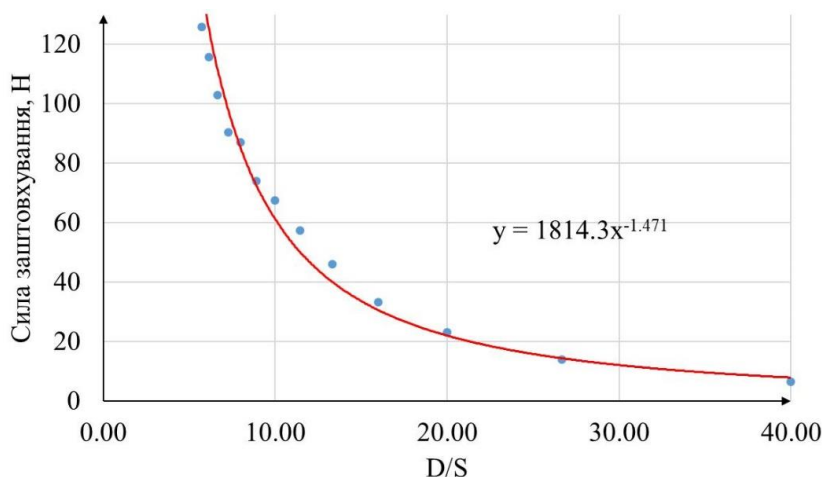
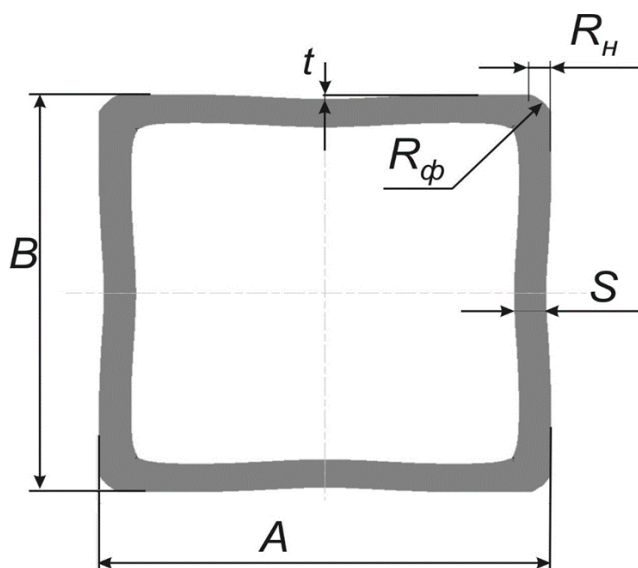


Рисунок 2 – Величина сили проштовхування в залежності від товстостінності заготовки

Дослідження формозміни поперечного перерізу з використанням створеної моделі показали, що в даному випадку напруження, що розтягають, розподілені на внутрішній частині вертикальної сторони і на зовнішній поверхні кутової ділянки; напруження, що стискають, розподілені по зовнішнім шарам прямої вертикальної ділянки і по внутрішній частині кутової зони. Аналіз отриманих даних показав, що безпосередньою причиною прогину по центру боку профілю труби є наявність в цьому перерізі напружень, що розтягають, у внутрішніх шарах і напружень, що стискають, в зовнішніх шарах з початку процесу формозміни. Від перерізу, що проходить через середину сторони по товщині, на внутрішній поверхні діють напруження, що розтягають, спрямовані в протилежні сторони до кутів труби, що і призводить до максимального прогину в цьому перерізі. При використанні інструменту з радіусом, рівним ∞ (тобто в валках з гладкою бочкою), така картина розподілу напружень залишається постійною до досягнення ступеня обтиску, при якому деформація зосереджується в кутових ділянках. Прогин в цьому випадку максимальний. Зменшення радіуса рівчака валка призводить до того, що при певному, меншому, ніж при використанні валків з гладкою бочкою, ступені обтиску профілю по висоті починають діяти тільки напруження, що стискають, по всьому перерізу середини сторони. Це є наслідком зміни місця та напрямку прикладеного контактного навантаження. При профілюванні труб з однаковими радіусами заокруглення в кутах на гладкій бочці і в валках з рівчаками по радіусу спостерігається різна картина формування сторін профілю. Це пов'язано з тим, що в перший момент сторона припиняє розгинатися, і вся деформація зосереджується в кутових ділянках. Аналіз отриманих даних підтверджує залежність форми сторін профілю від місця контакту інструменту і поверхні профільованої труби, а також від співвідношення D/S заготовки. Отриманий після моделювання процесу профілювання валками з гладкою бочкою профіль труби з увігнутістю сторін (як частинний випадок випуклості) та стовщенням в кутах представлений на рисунку 3.

Процес профілювання можливо умовно розбити на дві стадії. Спочатку відбувається загин і розгин різних ділянок поперечного перерізу, а при певній величині радіуса заокруглення до деформації згину додається осадження в

кутах профілю. Зі збільшенням товстостінності заготовки процес осадки в кутах настає раніше, при відносно великих радіусах заокруглення. У зв'язку з цим по всьому поперечному перерізу сторони раніше починають діяти тільки стискаючі напруження, що підтверджується результатами моделювання. Така картина напруженого стану веде до припинення збільшення прогину, що почався в початковій стадії профілювання, коли через розгинання по перерізу сторони профілю діють напруження різного знаку. При профілюванні тонкостінних труб за період згину прогин сторони досягає більшого абсолютного значення, що не дозволяє отримувати такі труби в калібрах, валки яких мають гладку бочку.



A, B – сторони труби, t – товщина стінки

Рисунок 3 – Профіль готової труби з ефектами формозміни

Висновки

З використанням методу скінчених елементів створено математичну модель процесу профілювання квадратних труб в неприводній чотирьохвалковій кліті проштовхуванням. Показана можливість реалізації сталого процесу при різних значеннях товстостінності заготовки. Визначено, що зі збільшенням показника D/S заготовки для труб зі сталі 19MnB4 спостерігається падіння величини, що відповідає за силу проштовхування заготовки. Отримані дані було апроксимовано та описано залежністю, що може

бути використана в інженерних розрахунках. З ростом показника D/S заготовки для труб зі сталі 19MnB4 спостерігається падіння величини відносного потовщення товщини стінки готової труби в кутових зонах та зростання величини увігнутості сторони готової труби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стальные трубы. Изготовление, применение, сортамент: Справочник / Ю.Г. Гуляев [та ін.] – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ» 2002. – 350 с.
2. Данченко В.Н. Производство профильных труб / Данченко В.Н., Сергеев В.В., Никулин Э.В. - М.: Интермет Инжиниринг, 2003. -224с.
3. Бояркін В. В., Ремез О. А., Польща О.С. Математичне моделювання процесу профілювання труб. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM’2023: тези доп. міжнарод. конф., м. Дніпро, 22 бер. 2023 р. / М-во освіти і науки України, Український державний університет науки і технологій Дніпро, 2023. С. 124 – 127.
4. Hordych, I., Herbst, S., Nürnberger, F., Boiarkin, V., Hubert, O., Maier, H.J. Manufacturing and Virtual Design to Tailor the Properties of Boron-Alloyed Steel Tubes(Book Chapter), Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Volume 93, 2020, Pages 21-44. ISSN: 16137736. DOI: 10.1007/978-3-030-38156-1_2
5. ДСТУ EN 10219-1:2006 Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих конструкційних сталей для металоконструкцій. Частина 1.
6. ДСТУ EN 10219-2:2006. Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих конструкційних сталей для металоконструкцій. Частина 2.
7. Стрижак В.И. Сравнительная эффективность производства профильных труб и замкнутых сварных профилей для сельхозмашиностроения: Учебник / В.И. Стрижак, М.Ф. Ратников, И.М. Зубова 1984. – 60-61 с.
8. Перспективы производства холоднодеформированных профильных труб и основы современной технологии их изготовления: Учебник / А.И. Дорохов [та ін.] – М.: Металлургия, 1982. – 31-36 с.
9. Новая технология производства профильных труб высокой точности в линии трубоэлектросварочного агрегата / П.Н. Калинушкин, В.Б. Фурманов, В.М. Пинчук, Л.М. Шлоссберг // Прогрессивные технологии и оборудование для трубного производства: Сб. науч. тр. ВНИТИ. – М.: Металлургия, 1987. – С. 66–69.
10. <https://www.qform3d.com/>

REFERENCES

1. Stalnie trubi. Izgotovlenie, primeneniye, sortament: Spravochnik / Yu.G. Gulyaev [ta in.] – Dnepropetrovsk: RIA «Dnepr-VAL» 2002. – 350 s.
2. Danchenko V.N. Proizvodstvo profilnikh trub / Danchenko V.N., Sergeev V.V., Nikulin E.V. -M.: Intermet Inzhiniring, 2003. -224s.
3. Boiarkin V. V., Remez O. A., Polshcha O.S. Matematychnye modeliyuvannia protsesu profilyuvannia trub. Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni – ITMM2023: tezy dop. mizhнарод. конф., m. Dnipro, 22 ber. 2023 r. / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Ukrainyskyi derzhavnyi universytet nauky i tekhnolohii, Dnipro, 2023. S. 124 – 127.
4. Hordych, I., Herbst, S., Nürnberger, F., Boiarkin, V., Hubert, O., Maier, H.J. Manufacturing and Virtual Design to Tailor the Properties of Boron-Alloyed Steel Tubes(Book Chapter), Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Volume 93, 2020, Pages 21-44. ISSN: 16137736. DOI: 10.1007/978-3-030-38156-1_2

5. DSTU EN 10219-1:2006 Profili porozhnysti zvarni kholodnoho formuvannia z nelehovanykh i dribnozernistykh konstruktsiinykh stalei dlia metalokonstruktsii. Chastyna 1.
6. DSTU EN 10219-2:2006. Profili porozhnysti zvarni kholodnoho formuvannia z nelehovanykh i dribnozernistykh konstruktsiinykh stalei dlia metalokonstruktsii. Chastyna 2.
7. Strizhak V.I. Sravnitel'naya effektivnost proizvodstva profilnikh trub i zamknytykh svarnikh profilei dlia selkhoz mashinostroeniya: Uchebnyk / V.I. Strizhak, M.F. Ratnikov, I.M. Zubova 1984. – 60-61 s.
8. Perspektivi proizvodstva kholodnodeformirovannykh profilnikh trub i osnovi sovremennoi tekhnologii ikh izgotovleniya: Uchebnyk / A.I. Dorokhov [ta in.] –M.: Metallurgiya, 1982. – 31-36 s.
9. Novaya tekhnologiya proizvodstva profilnikh trub visokoi tochnosti v linii truboelektrosvarochnogo agregata / P.N. Kalinushkin, V.B. Furmanov, V.M. Pinchuk, L.M. Shlossberg // Progressivnie tekhnologii i oborudovanie dlia trubnogo proizvodstva: Sb. nauch. tr. VNITI. – M.: Metallurgiya, 1987. – S. 66–69.
10. <https://www.qform3d.com/>

Received 02.01.2023.

Accepted 19.02.2023.

UDC 621.774

V. Boiarkin, O. Remez, O. Polshcha

MATHEMATICAL MODELING OF THE FORMING OF SQUARE CROSS SECTION HOLLOW PROFILES

Steel alloys containing manganese and boron are increasingly being used in mechanical engineering, including automotive and agricultural sectors. Products of critical application made from such steels, including hollow ones, have a high level of mechanical properties, surface hardness, and wear resistance. These products are obtained by profiling of previously electrically welded round pipes with a hot sheet stamping or pressure treatment (drawing, cold rolling, stamping). Technological parameters of combined processing methods are often determined by the results of experimental research, which, due to the complexity and cost of materials, leads to significant expenses. The application of mathematical modeling can reduce the number of experiments and forecast the quality of finished products. The research focuses on investigating the possibility of obtaining square hollow profiles by means of push-pulling through one stand of a pipe welding unit and defining the requirements for geometric parameters of the billet.

Using the FEM finite elements method with QForm software, a model of the process of square hollow profiles forming in by pushing a non-driven four-roll stand was created. The possibility of providing a stable process at different values of the thickness of the billet is shown. It was determined that with an increase in the D/S (diameter/wall thickness) index of the billet for 19MnB4 steel hollow profiles, there is a reducing of pushing force. The obtained data described by an equation that can be used in engineering calculations. With

an increase in the D/S index of the billet for 19MnB4 steel hollow profiles, there is reducing of the relative wall thickening in the corner zones and increasing of the convexity of the profile sides.

Keywords: steel, profiling, metal forming, pushing, force, shape change.

Бояркін Вячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Ремез Олег Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0002-5489-8798. E-mail: o.a.remez@ust.edu.ua.

Польща Олександр Станіславович, заступник директора ПП «Дніпро-Сервіс», м. Дніпро, Україна. E-mail: dniproservice.office@ukr.net.

Boiarkin Viacheslav, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State university of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Oleh Remez, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State university of Science and Technologies. ORCID ID: 0000-0002-5489-8798. E-mail: o.a.remez@ust.edu.ua.

Oleksandr Polshcha, deputy director private enterprise «Dnipro-Service», Dnipro, Ukraine. E-mail: dniproservice.office@ukr.net.