

ГУБСКИЙ С.О., ЧУХЛИБ В.Л., БИБА М.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ГНУТОГО ПРОФІЛЮ ЗІ ЗМІННИМ ПЕРЕРІЗОМ

В статті проведений узагальнюючий огляд підходів до виробництва гнутих профілів змінного перерізу, що використовуються в світі. Розглянуто актуальність використання моделювання напружено-деформованого стану профілю методом кінцевих елементів з метою прогнозування виникнення дефектів при його виробництві. Вказується на затребуваність профілів зі змінним перерізом. Описано схему формування та вказується на можливість обґрунтованого зменшення числа технологічних переходів. Промодельоване формоутворення коритного гнутого профілю зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою, показаний алгоритм задання граничних умов. Розглянуто зміну напружено-деформованого стану заготовки при проходженні її через кліть профілезинального стану.

Ключові слова: профіль, формування, напруження, деформація, переріз, моделювання, метод кінцевих елементів, прогнозування, дефект, граничні умови

ГУБСКИЙ С.А., ЧУХЛЕБ В.Л., БИБА Н.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГНУТОГО ПРОФИЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ

В статье проведен обобщающий обзор подходов к производству гнутых профилей переменного сечения, используемых в мире. Рассмотрена актуальность использования моделирования напряженно-деформированного состояния профиля методом конечных элементов с целью прогнозирования возникновения дефектов при его производстве. Указывается на востребованность профилей с переменным сечением. Описана схема формирования и указывается возможность обоснованного уменьшения числа технологических переходов. Выполнено моделирование формообразования корытного гнутого профиля с переменным поперечным сечением с нижней горизонтальной стенкой, показан алгоритм задания граничных условий. Рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния заготовки при прохождении ее через клеть профилегибочного стана.

Ключевые слова: профиль, формовка, напряжение, деформация, сечение, моделирование, метод конечных элементов, прогнозирование, дефект, граничные условия

HUBSKYI S. O., CHUKHLIB V. L., BIBA M. V.

MODELLING OF SHAPING OF ROLL-FORMED SECTION WITH VARIABLE SECTION

In article the generalizing overview of approaches to production of the roll-formed sections of variable section used in the world is carried out. The relevance of use of modeling of tensely deformed condition of a profile by a finite element method for the purpose of forecasting of appearance of defects by its production is considered. It is pointed out demand of profiles with variable section. The scheme of molding is described, and the possibility of reasonable reduction of number of technological transitions is specified. Modeling of shaping of trough roll-formed section with variable cross-section with the lower horizontal wall is executed, the algorithm of a task of boundary conditions is shown. Change of the intense deformed condition of preparation at its passing through a cage of a camp is considered.

Keywords: profile, molding, tension, deformation, section, modeling, finite element method, forecasting, defect, boundary conditions

1. Вступ. Виготовлення профілю з поступовою деформацією кромки в клітях є типовим технологічним процесом. В більшості випадків даний технологічний процес використовують для виготовлення гнутих профілів з постійним поперечним перерізом. Процес формозміни заготовки при виготовленні профілів з постійним перерізом досить широко вивчений. Але наразі в автомобільній, залізничній, авіаційній промисловості, суднобудуванні та в будівництві споруд (особливо каркасне будівництво) є затребуваність на гнуті профілі зі змінним перерізом, що виготовлені з поступовою деформацією кромки в клітях. В 2001 році шведська компанія-виробник Ortic розробила нову технологію виготовлення гнутих профілів зі змінним перерізом для 3D-панелей для дахів. В праці [1] було запропоновано виробляти П-подібні гнуті профілі зі змінним перерізом шляхом використання стандартних клітей для профілювання, але з можливістю зміни відстані між симетричними частинами валків в поперечному напрямі до вісі руху заготовки. Це досягалося завдяки сервоприводам, що отримували керуючі команди в залежності від швидкості подачі заготовки та заданої геометрії. В праці [2] пропонується виробництво гнутих профілів зі змінним перерізом по ширині та висоті, при цьому розглядається можливість використовувати для виготовлення профілів з високоміцної сталі.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням моделювання формоутворення та дослідження напружено-деформованого стану профілю зі змінним перерізом при його формоутворенні висвітлюється в наукових працях [1-6]. В більшості праць розглядається процес моделювання виникнення змінання кромки профілю при профілюванні криволінійних переходів, та висновки направленні на прогнозування виникнення та недопущення виникнення даного дефекту. В працях [2, 6] моделюють процес формоутворення змінного перерізу профілю по ширині та висоті. В переважній більшості дані дослідження виконанні з використанням програмного комплексу CAE-системи ABAQUS. В цілому, досі немає єдиного підходу до моделювання напружено-деформованого стану профілю зі змінними перерізами по його довжині методом кінцевих елементів з метою прогнозування виникнення дефектів при його виробництві. В програмному комплексі Qform моделювання формоутворення при виготовленні профілю зі змінним перерізом по його довжині з поступовою деформацією кромки в клітях в наукових працях висвітлено не достатньо. Можливість моделювати пружно-пластичні деформації в тонкостінному металі в Qform дозволяють досліджувати, наприклад, формоутворення при виробництві гнутих профілів методом поступового підгинання кромки.

3. Мета дослідження. Дослідження формоутворення при виготовленні профілю зі змінним перерізом по його довжині шляхом моделювання в програмному комплексі Qform.

4. Викладення основного матеріалу. Для моделювання обрана заготовка зі Ст3 з габаритними розмірами: товщина 2 мм, ширина 134 мм, довжина 2400 мм (умовне позначення (34...56)x19x(27,5...38,5)x2 мм), швидкість профілювання 10 м/хв., відстань між клітьми 300 мм. З даної заготовки виготовляється гнутий коритний профіль зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою від 34 мм (на початку сформованого профілю) до 56 мм (в кінці сформованого профілю), схема формування переходів I – IX з кутами підгинання в клітях 10°-18°-30°-42°-54°-66°-78°-88°-90° зображена на рис. 1.

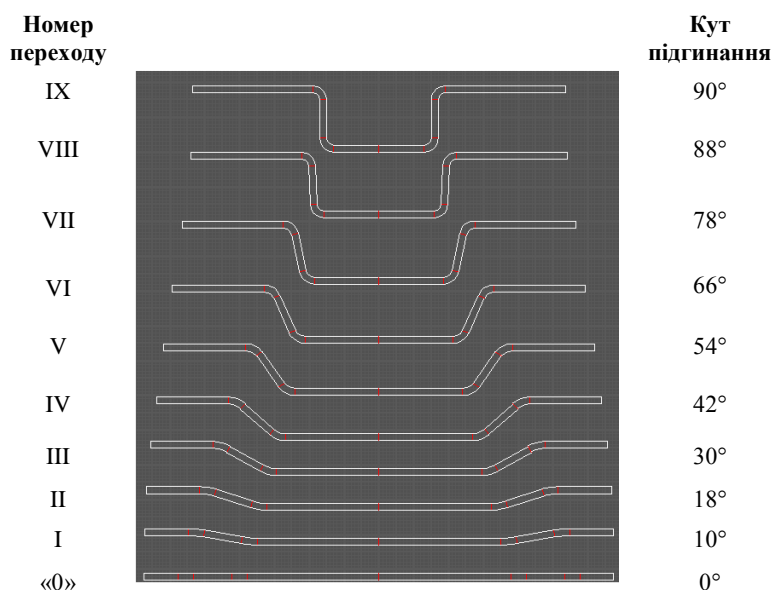


Рис. 1 – Схема формування переходів I – IX гнутого коритного профілю зі змінним поперечним перерізом з кутами підгинання в клітях 10°-18°-30°-42°-54°-66°-78°-88°-90°

Схема формування коритного гнутого профілю (рис. 1) виконана за класичною схемою з калібруванням валків для профілювання по третьому методу та одночасному формуванні всіх елементів профілю на одні і ті ж кути підгинання [7, 8]. Вісь формування профілю розміщується посередині нижньої горизонтальної стінки. Розглядається поштучне формування профілю з розміщенням полок вгору. Кількість переходів 9 – це класичний підхід. Як показує досвід цю кількість можливо обґрунтовано зменшити [9], але даний підхід в цій роботі не розглядається.

Кожен валок кліті складається з двох симетричних частин, які обертаються навколо своєї вісі з необхідною швидкістю. Також дві симетричні частини кожного валка мають можливість поперечного руху вздовж вісі обертання. На рис. 2 зображено 3D-моделі валків двох останніх клітей (стрілками позначені напрями обертання та руху заготовки). В центрі кожного валка зображені вирізи квадратної форми – це умовний виріз для контролю обертання валків при моделюванні, що не вносить суттєвого впливу на результати моделювання.

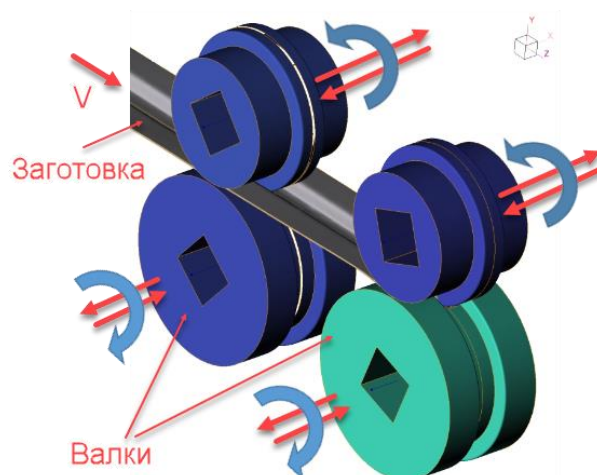


Рис. 2 – 3D-моделі валків двох останніх клітей (стрілками позначені напрями обертання та руху заготовки)

Попереднє формоутворення було виконано та проаналізовано в програмному комплексі UBECO – рис. 3. Латинськими літерами A...J позначені перерізи по довжині сформованого профілю.

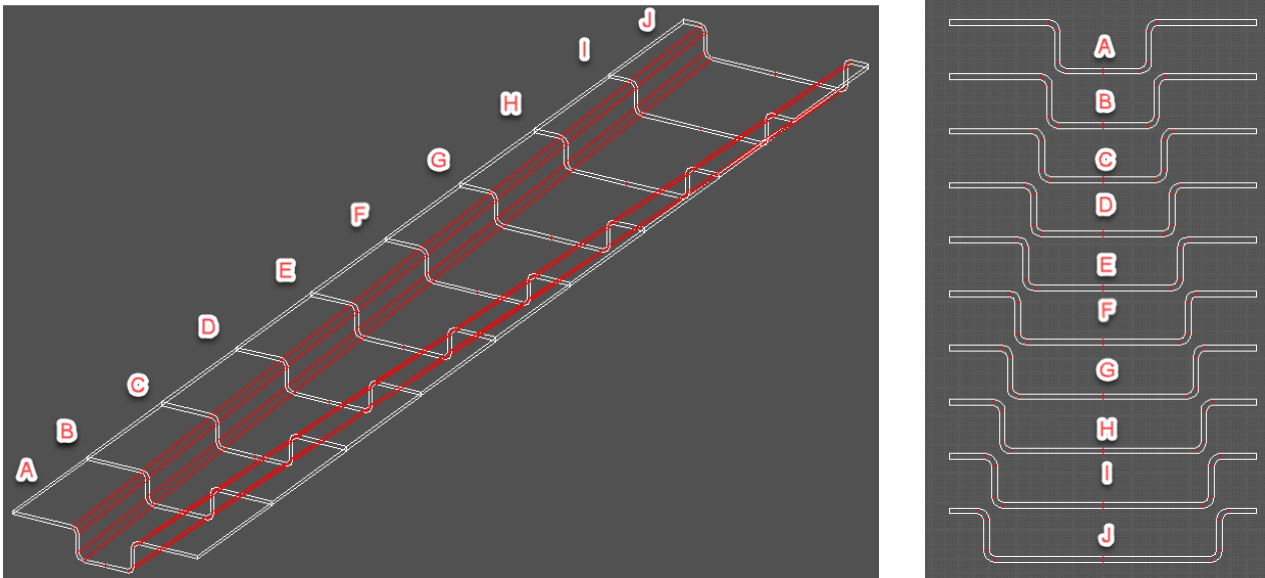


Рис. 3 – Схема поперечних перерізів коритного профілю зі змінним поперечним перерізом по довжині з основою від 34 мм до 56 мм

При переміщенні заготовки по клітках профілезгинального стану відбувається не тільки обертання валків, а ще й їх поперечний рух (розходження) перпендикулярно вісі заготовки валків за наступним алгоритмом. При заходженні заготовки в кліть – починається розходження симетричних частин валка (верхнього та нижнього) даної кліть з певною постійною швидкістю. Цей поперечний рух симетричних частин валка (верхнього та нижнього) буде продовжуватися до закінчення проходження заготовки через дану кліть.

При моделюванні процесу формоутворення коритного профілю зі змінним поперечним перерізом по довжині в Qform, необхідно для кожного проходу заготовки через кліть створити окрему операцію. Тип операції для даного завдання потрібно обирати «Деформація», з заданням додаткового параметру «З врахуванням пружно-пластичних деформацій». Це дає можливість враховувати в моделі деформованого матеріалу пружні властивості. Також обирається тип задачі «3D».

Всі 3D-моделі для моделювання формоутворення профілю створюються в будь-якій CAD-системі, а далі імпортуються в Qform. Після цього потрібно зазначити де «Заготовка», а де «Інструмент» та виконати позиціонування. Так як задача формоутворення при виготовленні профілю зі змінним перерізом по його довжині симетрична, то задається площина симетрії, це прискорить розрахунок поставленого завдання. Для валків, що обертаються навколо своєї вісі – потрібно задати вісі обертання. Також є можливість додати до завдання «Параметричну геометрію» певної форми із заданням її розміщення та геометрії з типом сітки «Кубічна», але в даному завданні дана опція не використовується.

Далі потрібно задати матеріал заготовки – Ст3, процес деформування проходить без підігріву. Більше властивостей заготовки для даного завдання задавати не потрібно.

Матеріал валків – сталь Х12МФ. Привод валків створюємо «Універсальний». Для перших валків (верхнього та нижнього), що не деформують заготовку, а подають в першу кліть задається тільки параметри «Обертання навколо вісі 1», швидкість та напрям обертання. Для всіх інших валків, при деформуванні заготовки, потрібно задавати в параметрах приводу «Універсальний» ще додатково «Напрямок руху», тобто розходження валків відносно заданої площини симетрії з параметром «Подача інструменту», де задається швидкість розходження валків. Також потрібно задати, що контакт валків та заготовки відбувається без змашування, тобто відбувається взаємодія сталь-сталь. В параметрах «Звести в контакт» потрібно задати – не зводити.

Кожна операція буде завершуватися при виконанні умови – обертання на певний кут заданого валка.

При необхідності можливо задати додаткову граничну умову «Штовхач», що призначений для штовхання заготовки в заданому напрямі та заборону переміщення поверхневих вузлів, для яких воно визначено, в площинах, що перпендикулярні напрямку штовхання. Для цієї умови задаються габарити, напрям та швидкість руху.

Кількість ітерацій моделювання (операцій) формування коритного гнутого профілю зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою буде складати вдвічі більше від кількості клітей, в яких проходить пружно-пластична деформація. В нашому кількості операцій складає 18.

Результати моделювання формування коритного гнутого профілю показано на рис. 4.

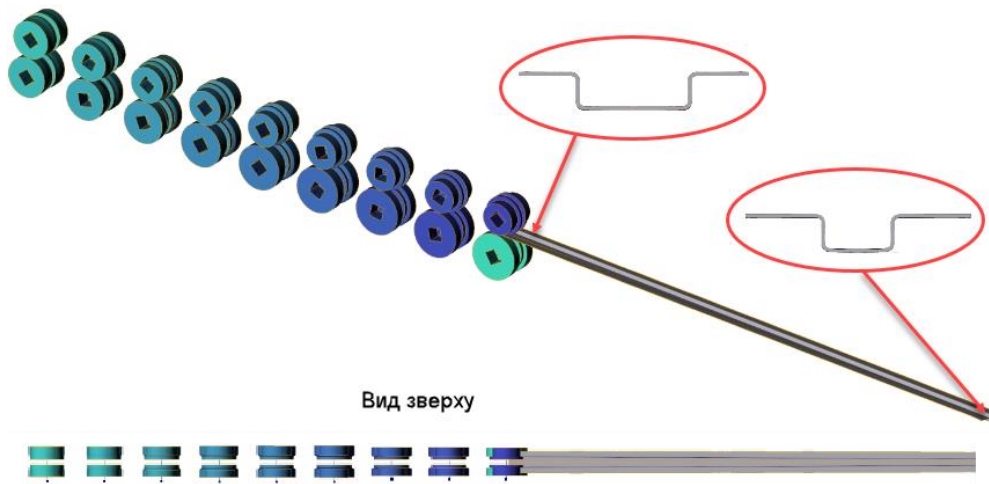


Рис. 4 – Результати моделювання формування коритного гнутого профілю зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою

На рис. 5,а показаний переріз передостанньої кліті стана, обрані для аналізу найбільш характерні точки на верхній частині заготовки – т. 167 (на відстані 8 мм від краю заготовки), т. 173 (перегин заготовки), т. 177 (на відстані 10 мм від середини заготовки). На рис. 5,б-г показані пластичні деформації та зміни інтенсивності напружень в даних точках при проходженні їх через передостанню кліть, що отримані після моделювання напружено-деформованого стану заготовки в Qform.

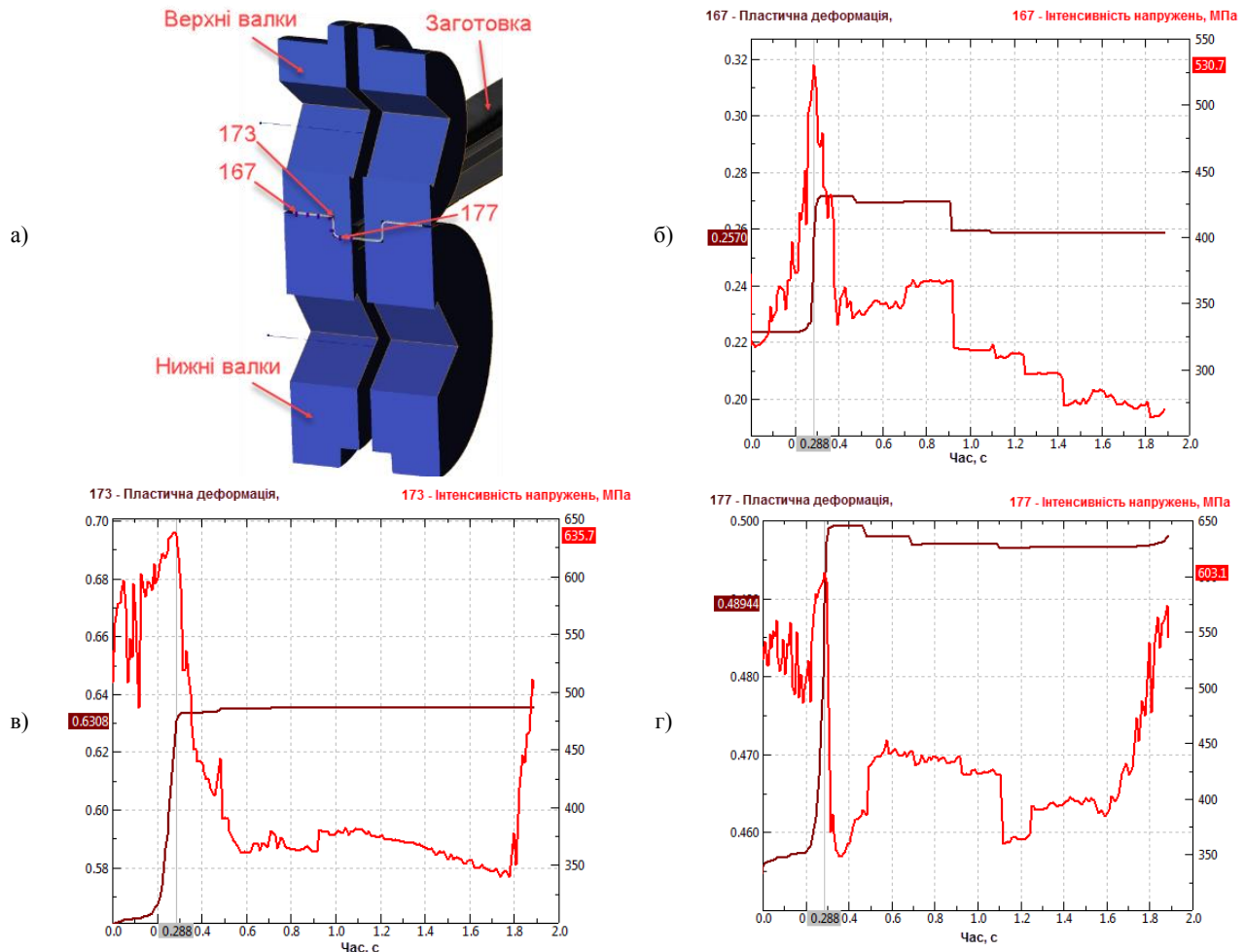


Рис. 5 – Переріз передостанньої кліті стана (а), пластичні деформації та зміни інтенсивності напружень в найбільш характерних точках (т.167, т.173, т.177) на верхній частині заготовки при проходженні їх через передостанню кліть (б-г)

Як видно з рис. 5,б-г напруження в заготовці в т.167, т.173, т.177 починають заздалегідь збільшуватися при приближенні їх до кліті, і поступово зменшуватися при віддаленні їх від кліті. Пластична деформація зменшується в т.167 та т.177 при виходу заготовки із кліті, внаслідок пруження.

Висновки. В роботі зроблений узагальнюючий огляд підходів до виробництва гнутих профілів змінного перерізу, що використовуються в світі. Немає єдиного підходу до моделювання напружено-деформованого стану профілю зі змінними перерізами по його довжині методом кінцевих елементів з метою прогнозування виникнення дефектів при його виробництві. З допомогою програмного комплексу Qform промодельоване формоутворення коритного гнутого профілю зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою, описаний алгоритм задання граничних умов. Показано зміну напружено-деформованого стану заготовки при проходженні її через кліть профілезгинального стану. Встановлено, що напруження в заготовці починають заздалегідь збільшуватися при приближенні їх до кліті, і поступово зменшуватися при віддаленні їх від кліті. Зменшення пластичних деформацій при виходу заготовки із кліті, відбувається внаслідок пруження.

Зміна напружено-деформованого стану заготовки та інструменту, конструкції клітей стана, електрична схема, алгоритм роботи програмного забезпечення мікропроцесорного керування в даній роботі не розглядалися та будуть висвітлені в наступних працях.

Список літератури:

1. Groche, P. *New tooling concepts for future roll forming applications* / Groche, P., von Breitenbach, G., Jckel, M., Zettler, A. – 4th International Conference on Industrial Tools, ICIT Conference. – Celje, Slovenia, 2003.
2. L.-O. I. Michael Lindgren *3D roll-forming of hat-profile with variable depth and width* / 1st International Congress on RollForming, RollFORM'09. – Bilbao, Spain, 2009.
3. GuĖ İcxekeken E. *Finite element simulation of flexible roll forming: a case study on variable width U channel* / GuĖ İcxekeken E, Abeer A, Sedlmaier A, et al. – In: The 4th international conference and exhibition on design and production of machines and dies/molds, Cesme, 21–23 June 2007.
4. Zhao W. *Finite element analysis and fracture forecast of U channel flexible roll forming* / Zhao W, Yan Y, Wang H, et al. – Adv Mat Res 683, 2013. – P. 604–607.
5. *Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming* / Kasaei M.M., Moslemi Naeini H., Liaghat G.H, et al. – The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. Vol. 50(7), 2015. – P. 529–541.
6. *Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles* / Ahmad Erfani Moghadam. – Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University, 2017. – 159 p.
7. Тришевский И.С. *Калибровка валков для производства гнутих профилей проката* / Тришевский И.С., Мирошниченко В. И., Стукалов В. П. и др. // Київ: Техніка, 1980. 168 с.
8. Halmos T. *Roll Forming Handbook* / Edited by George T. Halmos Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583 p.
9. Чухліб В. Л. *Формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при виробництві гнутих профілів* / В. Л. Чухліб, С. О. Губський, А. О. Окунь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 2. – С. 169-173.

References (transliterated)

1. Groche, P. *New tooling concepts for future roll forming applications* / Groche, P., von Breitenbach, G., Jckel, M., Zettler, A. – 4th International Conference on Industrial Tools, ICIT Conference. – Celje, Slovenia, 2003.
2. L.-O. I. Michael Lindgren *3D roll-forming of hat-profile with variable depth and width* / 1st International Congress on RollForming, RollFORM'09. – Bilbao, Spain, 2009.
3. GuĖ İcxekeken E. *Finite element simulation of flexible roll forming: a case study on variable width U channel* / GuĖ İcxekeken E, Abeer A, Sedlmaier A, et al. – In: The 4th international conference and exhibition on design and production of machines and dies/molds, Cesme, 21–23 June 2007.
4. Zhao W. *Finite element analysis and fracture forecast of U channel flexible roll forming* / Zhao W, Yan Y, Wang H, et al. – Adv Mat Res 683, 2013. – P. 604–607.
5. *Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming* / Kasaei M.M., Moslemi Naeini H., Liaghat G.H, et al. – The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. Vol. 50(7), 2015. – P. 529–541.
6. *Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles* / Ahmad Erfani Moghadam. – Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University, 2017. – 159 p.
7. Trishevskij I.S. *Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutikh profilej prokata* [Calibration of rolls for production of gnuty profiles of rolling]. – Kiyiv: Tekhni`ka. 168 s. (1980).
8. Halmos T. *Roll Forming Handbook* / Edited by George T. Halmos Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583 p.
9. Gubskij S.O. *Formalizovani` piddkhodi do viznachennya chisla tekhnologichnikh perekhodi`v pri virobnicztvi` gnutikh profi`li`v* [Formalized approaches to determining the number of technological transitions in the production of bent profiles] *Vі`snik Naczi`onal`nogo tekhnichnogo unі`versitetu «KhPI»*. Seri`ya: Mashinoznavstvo ta SAPR : zb. nauk. pr. – Kharkiv : NTU «KhPI», # 2. – S. 169-173. (2020).

Поступила (received) 15.03.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Губський Сергій Олександрович (Губский Сергей Александрович, Hubskeyi Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Комп'ютерного моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; тел.: (066) 219-20-50; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

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

Біба Микола Вікторович (Бива Николай Викторович, Biba Mykola) – кандидат технічних наук, директор MICAS Simulations Ltd; м. Оксфорд, Велика Британія; e-mail: nick@qform.com.