

А. В. НОВОШИЦЬКИЙ, С. Ж. БОДУ, Д. В. ФАБРИЦІЄВ,
О. П. ШУМІЛОВ, О. Л. НІКОЛАЄВ

Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ЗІ СФЕРИЧНИМИ ІНТЕНСИФІКАТОРАМИ ТЕПЛОВІДДАЧІ

Удосконалення теплообмінного обладнання є одним з ключових напрямів підвищення енергоефективності в промислових і енергетичних системах. Особливої актуальності набувають технології виготовлення тонкостінних теплообмінних елементів з рельєфною поверхнею, що забезпечує інтенсифікацію тепловіддачі. Одним із перспективних рішень є застосування плоских деталей із сферичними виступами, формування яких потребує високої точності та стабільності геометричних параметрів. У статті розглянуто технологію профілювання таких деталей з використанням процесу профілювання з поздовжнім розтягом. На відміну від традиційних методів формоутворення, зокрема штампування та волочіння, запропонований підхід дозволяє зменшити енергозатрати, уникнути залишкових деформацій і підвищити повторюваність геометрії профілю. Ключовим технологічним фактором є кероване зусилля розтягу, що накладається на заготовку під час проходження профілювальних роликів. Експериментально встановлено, що оптимальний результат досягається при рівні напружень, що становить 85–95% від границі текучості матеріалу, саме в цьому діапазоні формується якісний рельєф без хвилястості в зонах утворення сферичних виступів та на кромках, поздовжня кривизна відповідає значенням передбаченим правкою розтягом. Описано конструкцію та принцип роботи експериментального устаткування – профілювальної установки, надано її технічні характеристики та загальний вигляд. Виготовлення дослідних партій профілів на експериментальній установці із рулонної латунної штаби шириною 74 мм та товщиною 0,4 мм підтвердило можливість виготовлення профілів зі сферичними виступами послідовною локальною формозміною при дії поздовжнього розтягу та дозволило уточнити технічні вимоги, необхідні для проектування дослідно-промислової профілювальної установки. Запропонована технологія підтверджена практичними результатами та має потенціал для впровадження у серійне виробництво теплообмінних елементів. Вона може бути адаптована до виготовлення деталей із різними типами рельєфу та використана в суміжних галузях машинобудування таких як включно з авіаційна, енергетична й суднобудування.

Ключові слова: теплообмінні апарати; технологія профілювання; профілювання з поздовжнім розтягом; сферичні інтенсифікатори тепловіддачі; експериментальне устаткування.

Вступ

У сучасних енергетичних, промислових і комунальних системах теплообмінні апарати відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного теплопереносу. З метою зменшення габаритів та підвищення ефективності теплообміну активно застосовуються інтенсифіковані теплообмінні поверхні, зокрема з локальними елементами, що сприяють турбулізації потоку. Одним із перспективних напрямів є використання плоских деталей з сферичними виступами – інтенсифікаторами тепловіддачі [1 - 3]. Ефективність таких конструкцій значною мірою залежить від точності та стабільності їх геометричних параметрів, що зумовлює потребу в розробці відповідної технології та устаткування для їх виготовлення.

Більшість традиційних методів формування теплообмінних поверхонь, таких як штампування [4] чи волочіння [5], характеризуються високою енерго-

ємністю, низькою гнучкістю налаштувань та недостатньою точністю для створення складних рельєфів. В роботі [6] наведена оригінальна технологія ротаційного штампування, але і вона має обмеження, зокрема високу складність устаткування та ймовірність виникнення поздовжньої кривизни виробу.

Особливо складним є завдання виготовлення сферичних виступів з необхідною геометричною точністю та мінімальними залишковими деформаціями. Це зумовлює потребу у створенні експериментального устаткування, що дозволяє реалізувати процес формоутворення деталей із використанням поздовжнього розтягу та контролю деформацій. Розробка такої технології забезпечить підвищення точності, повторюваності та технологічної ефективності виготовлення елементів теплообмінних апаратів, а також відкриє можливості для подальшого масштабування у промислових умовах.



Метою роботи є розробка технології та експериментального устаткування для виготовлення плоских деталей теплообмінних апаратів зі сферичними інтенсифікаторами тепловіддачі з високою геометричною точністю, можливістю швидкого переналагодження на випуск плоских деталей з іншою конфігурацією рельєфу.

Постановка задачі дослідження

Об'єктом досліджень є процес формоутворення плоских деталей зі сферичними виступами зі штабових або листових заготовок для теплообмінних апаратів.

Технологічний процес формоутворення профілю зі сферичними виступами з штабової або листової заготовки [7] (рис. 1) передбачає проведення наступних операцій: розміщення заготовки між рухомим та нерухомим затискачами; затискання кінцевих ділянок; розтяг заготовки; подача каретки, оснащеної профілювальними роликми, до нерухомого захвату; змикання профілювальних роликів і заготовки; переміщення каретки до рухомого захвату; розвантаження; розмикання профілювальних роликів і затискачів; виймання готового профілю.

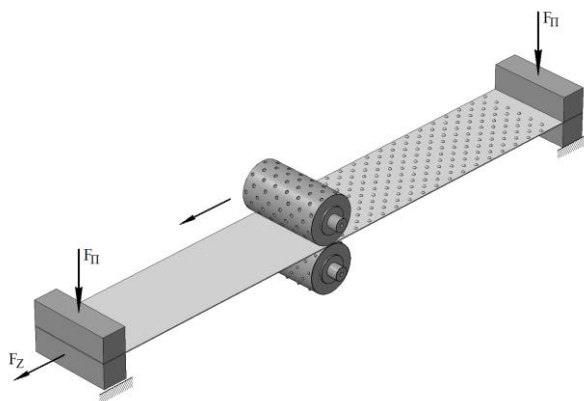


Рис. 1. Схема виготовлення профілю згідно технології профілювання з поздовжнім розтягом

Результати

Дослідження проводились на спроектованій та виготовленій експериментальній установці за допомогою виготовленого технологічного оснащення — роликів з відповідними сферичними виступами та заглибинами.

Для налаштування профілювального устаткування визначались величини сили розтягу заготовки F_Z для конкретного перерізу профілю та механічних характеристик її матеріалу, та сила необхідна для затиску заготовки у кінцевих затискачах $F_П$.

Необхідна рельєф профілів утворювався за рахунок відповідного рельєфу профілювальних роликів.

Формозміна заготовки проводилася за один прохід профілювальних роликів.

Попередня правка штабової заготовки була не потрібна.

Конструктивну схему експериментальної установки показано на рис. 2. Технічна характеристика установки наведена в таблиці 1.

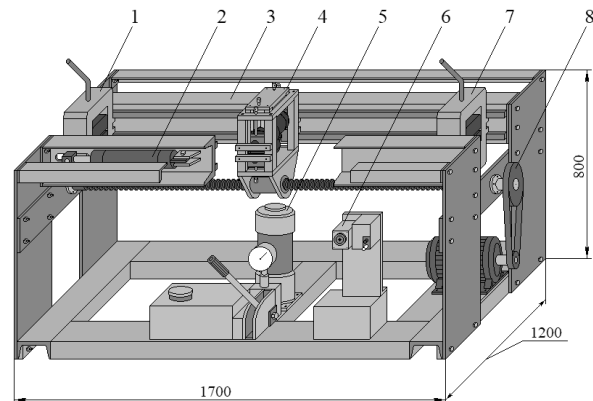


Рис. 2. Схема експериментальної профілювальної установки:

- 1 – головка затискна тягнуча; 2 – гідроциліндри; 3 – корпус; 4 – каретка; 5 – гідростанція; 6 – пульт керування; 7 – головка затискна нерухома; 8 – механізм переміщення каретки

Таблиця 1

Технічна характеристика установки

Параметр	Значення
Товщина оброблюваного матеріалу	0,2...1 мм
Максимальна ширина заготовки	100 мм.
Максимальна довжина профілю (повторно-циклічне виготовлення)	без обмежень
Мінімальна довжина профілю	1500 мм
Хід каретки	1400 мм
Швидкість переміщення каретки	0,1 м/с
Сила розтягу, максимальна	20 кН
Сила притискання в затискачах	50 кН
Насосна станція	ручна
- робочий тиск гідростанції	2 МПа
Привід пересування:	
- тип електродвигуна	4А80В4УЗ
- частота обертання	1430 хв ⁻¹
- потужність	0,8 кВт
Маса установки	до 200 кг

Корпус 3 включає силову частину, приєднану до зварної конструкції з бічних стінок, швелерів, кутників і захисних листів. В середині корпусу розміщуються механізм пересування каретки 8, станція насосна 5, пульт керування 6.

Силова частина сформована з поздовжніх балок та бічних пластин. До поздовжніх балок – швелерів приєднані виконані з високою точністю поздовжні планки, що є направляючими для каретки 4 і згинальних головок 1 і 7. Поздовжні балки сприймають навантаження, що виникають при розтягу та профілюванні заготовки.

Затискні головки виконані у вигляді рамок, у верхній частині яких є різьбові отвори для силових гвинтів, що створюють необхідне зусилля для деформування і затиску кінцевих ділянок заготовки. У середині рамок розміщуються знімні штампи, робочі поверхні яких відповідають формі поперечного перерізу профілів, що виготовляються або є плоскими. Рамки затискних головок мають бічні виступи для точної установки щодо напрямних поздовжніх планок. Нерухома затискна головка 7 кріпиться в необхідному місці болтами та штифтами до поздовжніх балок. Рухома затискна головка 1 з'єднана з боків з штоками гідроциліндрів 2 за допомогою захватів і болтів. Корпус кожного гідроциліндра кріпиться болтами до планок, приварених до бічної стінки швелерів. При подачі тиску гідроциліндри, в заготовці, кінцеві ділянки якої зафіксовані в затискачах, створюється необхідне постійне зусилля розтягу. При додаванні до заготовки навантаження розтягу, поздовжні балки піддаються дії стискаючих навантажень, які розташовуються в площині симетрії швелерів, що виключає можливість виникнення значних згинальних моментів.

У каретці встановлюється змінна обойма з профілювальними роликами. В обоймі розміщуються бронзові вкладиші, що є підшипниками ковзання, та профілювальні ролики. Необхідна міжосьова відстань між профілювальними роликами створюється за допомогою силових гвинтів обойми та набору прокладок між бронзовими вкладишами.

Обойма має можливість вільно переміщатися у вертикальному напрямку, відслідковуючи положення деформованих ділянок заготовки. На корпусі каретки виконані напрямні для переміщення поздовжніми планками, закріпленими на швелерах. У нижній частині корпусу каретки є провущини, в які встановлюється гайка силового гвинта механізму пересування.

Механізм пересування здійснює зворотно-поступальний рух каретки. Він складається з електродвигуна, клинопасової передачі та передачі гвинт-гайка. Опори ходового гвинта розміщуються у бічних пластинах корпусу. Опора ходового гвинта, на вихідному кінці якого розташовується шків ремінної передачі, включає здвоєні радіально-упорні підшипники. Протилежна опора, що включає радіальний кульковий підшипник, виконана плаваючою.

Для живлення гідроциліндрів використана насосна станція з ручним приводом та пневмогідроаккумулятором, який дозволяє компенсувати витoki в гідросистемі та підтримувати заданий тиск у гідроциліндрах переміщення рухомої затискної головки. Тиск у гідросистемі контролюється манометром. Оскільки деформації розтягу заготовки невеликі, то за допомогою пневмогідроаккумулятора забезпечується практично постійне зусилля розтягу без додаткового регулювання тиску ручним насосом.

Гідроциліндри двосторонньої дії створюють необхідний розтяг заготовки при переміщенні рухомої згинальної головки.

При виготовленні профілів в повторно-циклічному режимі перед експериментальною установкою розміщувалася рулонниця, в якій був рулон штаби довжиною 30...40 м.

Загальний вигляд установки представлений на рис. 3.



Рис. 3. Загальний вигляд установки

Профілювальні ролики виготовлялись зі сталі 45, без термообробки. Отвори виконувались на верстаті з ЧПК. У ролик з виступами завальцьовувались сталі кульки (рис. 4). Заготовкою була рулонна штаба з латуні Л63 шириною 74 мм та товщиною 0,4 мм.

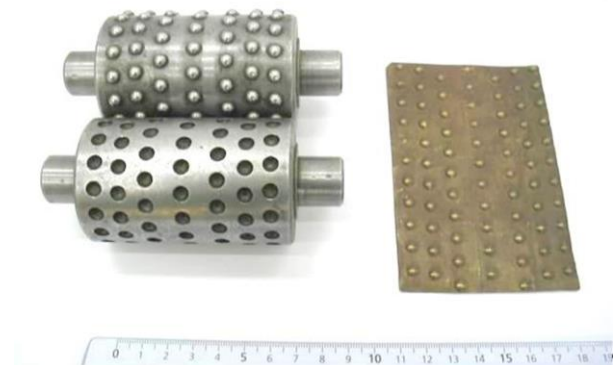


Рис. 4. Профілювальні ролики та зразок виготовленого профілю

При проведенні досліджень здійснювалось виготовлення профілів при значеннях сили розтягу F_Z , яка створювала напруження розтягу в межах від нуля до границі текучості матеріалу заготовки σ_T .

Після профілювання без впливу поздовжньої сили розтягу, або невеликих її значення, виготовлені профілі мали деяку поздовжню кривизну та хвилястість поблизу сферичних виступів та на кромках.

Процес профілювання при напруженнях розтягу в заготовці рівних границі текучості матеріалу ($\sigma_Z = \sigma_T$) проходив не стабільно, траплялись розриви заготовок.

Найкращі результати було отримано при значеннях сили розтягу F_Z , яка викликала в заготовці напруження розтягу $(0,85..0,95)\sigma_T$. Хвилястість кромки була відсутня і не спостерігалась поблизу сферичних виступів. Поздовжня кривизна відповідала значенням передбаченим правкою розтягом.

Виготовлення дослідних партій профілів на експериментальній установці підтвердило можливість виготовлення профілів зі сферичними виступами послідовною локальною формозміною при дії поздовжнього розтягу та дозволило уточнити технічні вимоги, необхідні для проектування дослідно-промислової профілювальної установки.

Висновки

Експериментальні дослідження технології виготовлення плоских деталей зі сферичними виступами із рулонної латунної штаби шириною 74 мм та товщиною 0,4 мм. в умовах, близьких до промислового виробництва, на спроектованій і виготовленій експериментальній установці показали, що розроблена технологія є придатною для виготовлення деталей теплообмінних апаратів зі сферичними інтенсифікаторами теплообміну.

Наявність поздовжньої сили розтягу при формуванні запобігає утворенню хвилястості поблизу сферичних виступів та на кромках штабової заготовки, а також виникненню поздовжньої кривизни виготовлених деталей.

Внесок авторів: формулювання проблеми, організація роботи колективу – **А.В. Новошицький**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **С.Ж. Боду, Д.В. Фабріцій**; розробка устаткування – **А.В. Новошицький, О.П. Шумілов, О.Л. Ніколаєв**; проектування технологічного оснащення – **С.Ж. Боду, О.П. Шумілов, Д.В. Фабріцій**; аналіз результатів досліджень – **А.В. Новошицький, С.Ж. Боду, Д.В. Фабріцій**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису

Література

1. Numerical and Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer in Heat Exchanger Channels with Different Dimples Geometries / P. Ying, Y. He, H. Tang, & Y. Ren // *Machines*. - 2021. - Vol. 9(4). - 72 p. doi: 10.3390/machines9040072.
2. Rao, Y. Heat transfer of turbulent flow over surfaces with spherical dimples and teardrop dimples / Y. Rao, B. Li, & Y. Feng // *Experimental Thermal and Fluid Science*. - 2015. - Vol. 61. - P. 201–209. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2014.10.030.
3. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена [Текст] : монография / Ю. Ф. Гортышов [и др.] ; под общ. ред Ю. Ф. Гортышова. – Казань, 2009. – 531 с.
4. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.
5. Roberts, W. L. Cold Rolling of Steel [Text] / W. L. Roberts. – New York and Basel: CRC Press, 1978. – 808 p. doi: 10.1201/9781315139661.
6. Halmos, G. T. Roll Forming Handbook [Text] / G. T. Halmos. – Taylor and Francis, 2006. – 583 p. doi: 10.1201/9781420030693.
7. Пат. UA 79278 Україна. Спосіб виготовлення рифлених профілів [Текст] / С. М. Соловійов, & А. В. Новошицький. – № 20041008663 ; заявл. 25.10.2004; опубл. 11.06.2007. – Бюл. № 8.

References

1. Ying, P., He, Y., Tang, H., & Ren, Y. *Numerical and Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer in Heat Exchanger Channels with Different Dimples Geometries*. Machines, 2021, vol. 9(4). 72 p. doi: 10.3390/machines9040072.
2. Rao, Y., Li, B., & Feng, Y. *Heat transfer of turbulent flow over surfaces with spherical dimples and teardrop dimples*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, vol. 61, pp. 201–209. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2014.10.030.
3. Gortyshov, Y. F. *Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена* [Thermal-hydraulic efficiency of promising methods of heat transfer intensification in the channels of heat exchange equipment. Intensification of heat transfer: monograph]. Kazan, 2009. 531 p. (in Russian).
4. Romanovskiy, V. P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Cold Stamping Handbook] (6th ed., rev. and add.). Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1979. 520 p. (in Russian).
5. Roberts, W. L. *Cold Rolling of Steel*. New York and Basel: CRC Press, 1978. 808 p. doi: 10.1201/9781315139661.
6. Halmos, G. T. *Roll Forming Handbook*. Taylor and Francis, 2006. 583 p. doi: 10.1201/9781420030693.
7. Solovyov, S. M., & Novoshytskyi, A. V. *Sposib vyhotovlennya ryfnykh profiliv* [Method of manufacturing corrugated profiles]. Patent UA № 79278, 2007. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 20.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

TECHNOLOGY AND EXPERIMENTAL EQUIPMENT USED
FOR THE MANUFACTURE OF FLAT PARTS OF HEAT EXCHANGERS
WITH SPHERICAL HEAT TRANSFER INTENSIFIERS

Anton Novoshytskyi, Svitlana Bodu, Dmytro Fabritsyiev,
Aleksandr Shumilov, Aleksandr Nikolaev

The improvement of heat exchange equipment is one of the key directions for increasing energy efficiency in industrial and energy systems. Technologies for manufacturing thin-walled heat exchange elements with a relief surface, which provides heat transfer intensification, are becoming particularly relevant. One of the promising solutions is the use of flat parts with spherical protrusions, the formation of which requires high accuracy and stability of geometric parameters. This study considers the technology of profiling such parts using the bending process with longitudinal tension. Unlike traditional forming methods, particularly stamping and drawing, the proposed approach reduces energy consumption, avoids residual deformations, and increases the repeatability of the profile geometry. The controlled tensile force imposed on the workpiece during the passage of the profiling rollers is a key technological factor. It has been experimentally established that the optimal result is achieved at a stress level of 85–95% of the yield strength of the material. It is in this range that a high-quality relief is formed without waviness in the zones of formation of spherical protrusions and on the edges, and the longitudinal curvature corresponds to the values 85–95% predicted by the tension correction. The design and principle of operation of the experimental equipment – the profiling unit is described, along with its technical characteristics and general appearance. The production of experimental batches of profiles on the experimental unit confirmed the possibility of manufacturing profiles with spherical protrusions by sequential local deformation under the action of longitudinal tension and clarified the technical requirements for the design of an experimental and industrial profiling unit. The proposed technology is confirmed by practical results and has the potential to be implemented in the serial production of heat exchange elements. It can be adapted to the manufacture of parts with various types of relief and used in related mechanical engineering industries, such as aviation, energy, and shipbuilding.

Keywords: heat exchangers; profiling technology; profiling with longitudinal tension; spherical heat transfer intensifiers; experimental equipment.

Новошицький Антон Володимирович – канд. техн. наук, доц. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Боду Світлана Жаківна – старш. викл. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Фабріцисв Дмитро Віталійович – асп. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Шумілов Олександр Павлович – канд. техн. наук, доц. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Ніколаєв Олександр Львович – канд. техн. наук, доц. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Anton Novoshytskyi – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: anton.novoshytskyi@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3232-4718.

Svitlana Bodu – Senior Lecturer at the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: svitlana.bodu@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1932-0955.

Dmytro Fabritsyiev – PhD Student of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: dmytro.fabritsyiev@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5810-2783.

Aleksandr Shumilov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: aleksandr.shumilov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1325-454X.

Aleksandr Nikolaiev – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: aleks.nikolaiev61@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9371-8288.