

УДК 66.045 : 621.981

doi: 10.32620/aktt.2025.4sup.2.15

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

*Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна*

## РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОФІЛЮВАННЯ З ПОЗДОВЖНІМ РОЗТЯГОМ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

Виробництво пластинчатих теплообмінних апаратів здійснюється на спеціалізованих підприємствах із використанням потужного пресового устаткування та спеціального штампового оснащення. Основою теплообмінних апаратів є теплопередаючі елементи, які здійснюють теплопередачу між двома середовищами. Форму й розміри теплообмінних апаратів вибирають залежно від фізичних властивостей теплоносіїв, характеру їх руху. Традиційні технології профілювання теплопередаючих елементів штамповкою є енергоємними та в ряді випадків не можуть забезпечити якість теплообмінних апаратів із високоміцних легованих сталей, алюмінієвих і мідних сплавів. У сучасних умовах раціональним може бути виробництво теплопередаючих тонкостінних профільних елементів на основі технології профілювання локальним силовим впливом із поздовжнім розтягом, що дозволяє виготовляти різноманітні тонкостінні профілі з необхідною точністю й розмірною стабільністю. Метою роботи є розробка інженерної методики розрахунку силових параметрів для налаштування профілювального устаткування та визначення геометричних параметрів технологічного оснащення. Отримати необхідні залежності можливо при рішенні задачі жорсткопластичного згину штаби при дії на неї поздовжнього навантаження-розтягу. При теоретичному аналізі процесу деформування штаби використано гіпотези та припущення, які застосовуються при дослідженнях жорсткопластичного згину й засновані на деформаційній теорії пластичності. Використовується гіпотеза плоских перерізів. Поставлена задача розглядалася для ідеального жорсткопластичного матеріалу з лінійним зміцненням. Отримані результати: проаналізовано напружено-деформований стан штаби з матеріалу з лінійним зміцненням при її жорсткопластичному згині з поздовжнім пружним розтягом; визначено положення нейтрального шару напружень у поперечному перерізі; отримано залежності для визначення відносного згинального моменту, необхідного для згинання штаби з поздовжнім розтягом; наведено аналітичні залежності, що дозволяють визначати пружне пружинення й залишкову кривизну; розроблено програмне забезпечення для практичних розрахунків геометричних параметрів технологічного оснащення та силових параметрів профілювального устаткування.

**Ключові слова:** теплообмінні апарати; технологія виготовлення; гнуття з поздовжнім розтягом; жорсткопластичний згин; поздовжній розтяг; розрахунок параметрів.

### Вступ

Теплообмінні апарати застосовуються в енергетиці, різних типах промисловості та комунальному господарстві. Виробництво пластинчатих теплообмінних апаратів здійснюється на спеціалізованих підприємствах з використанням потужного пресового устаткування і спеціального штампового оснащення з обмеженням розмірів і нестабільністю форм теплопередаючих елементів.

Основою теплообмінних апаратів є теплопередаючі елементи, які здійснюють теплопередачу між двома середовищами. Форму і розміри теплообмінних апаратів вибирають в залежності від фізичних властивостей теплоносіїв, характеру їх руху.

Існує значна інформаційна база для дослідження та визначення основних механізмів і методів інтенсифікації теплообміну для різних теплопередаючих поверхонь.

Загальним недоліком робіт, які використовують теоретичний підхід до опису теплогідравлічних процесів теплопередачі є те, що не розглядається фактична детальна картина технології виготовлення і умов експлуатації теплообмінних апаратів.

Традиційні технології профілювання штамповкою є енергоємними і в ряді випадків не можуть забезпечити якість теплообмінних апаратів із високоміцних легованих сталей, алюмінієвих та мідних сплавів та економічну доцільність.



[Creative Commons Attribution  
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

В сучасних умовах раціональним є виробництво тонкостінних профільних елементів на основі технології профілювання локальним силовим впливом з поздовжнім розтягом, що дозволяє виготовляти різноманітні тонкостінні профілі з необхідною точністю і розмірною стабільністю [1 - 3].

Технологія передбачає послідовну локальну формозміну заготовки при дії на неї поздовжньої сили розтягу.

Технологія є універсальною, універсальною, забезпечує можливість виготовлення теплопередаючих елементів різноманітної конфігурації [4 - 7].

Для визначення технологічного процесу профілювання необхідно розв'язання задачі жорсткопластичного деформування.

Методи розв'язання задачі жорсткопластичного деформування розглянуті у різних роботах, однак вплив попереднього поздовжнього розтягу не розглядався.

Теоретичні дослідження жорсткопластичного деформування заготовки при дії поздовжньої сили є актуальними і необхідні для проектування і налаштування профілювального устаткування в відповідного технологічного обладнання.

### Постановка задачі дослідження

Формоутворення профілів відбувається наступним чином: після місцевого згину кінцевих ділянок заготовки і прикладання поздовжньої сили деформації згину розповсюджуються по частині довжини заготовки з обох кінців, унаслідок переміщення профілювальних роликів формується профіль (рис. 1).

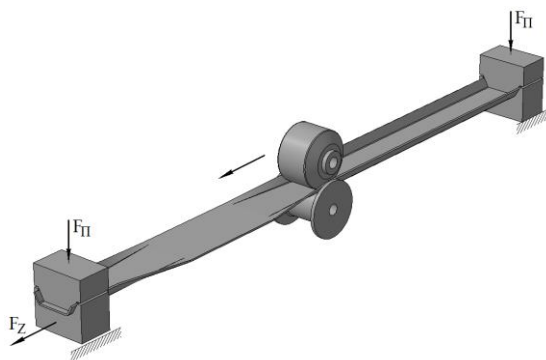


Рис. 1. Схема виготовлення профілю згідно технології гнуття з поздовжнім розтягом

Необхідна форма профілів утворюється в момент проходження профілювальних роликів. У зоні розвантаження після проходження роликів процес формоутворення профілю супроводжується пружиненням, тому форму робочих поверхонь роликів та кін-

цевих затискачів необхідно розраховувати відповідним чином.

У результаті прикладання сили розтягу до заготовки значно зменшуються згинальний момент, пружинення. Формозміна заготовки обумовлена переважно тангенціальними пластичними деформаціями стиску, тому в місцях згину не виникає стоншення заготовки.

Після попереднього деформування кінцевих ділянок заготовки і наступного прикладання поздовжньої сили на ділянці між кінцевими затискачами і роликками виникає поздовжній згинальний момент, що прагне надати заготовці необхідну форму. Формозміна заготовки проводиться за один прохід профілювальних роликів без виникнення хвилястості полиць.

Створення попереднього поздовжнього розтягу заготовки забезпечує оптимальні умови для формоутворення профілю. Запобігається виникнення поздовжньої зігнутості, а також скрученості.

Сила попереднього розтягу визначається в залежності від розмірів поперечного перерізу заготовки і механічних характеристик її матеріалу.

Для налаштування профілювального устаткування [2, 8, 9] необхідно визначити величину сили розтягу заготовки для конкретного профілю, та силу необхідну для деформування та затиску заготовки у кінцевих затискачах.

При проектуванні технологічного оснащення необхідними даними є відповідні форми поперечних перерізів штампів кінцевих затискачів та профілювальних роликів, з урахуванням пружинення.

Для встановлення основних силових параметрів технологічного процесу виготовлення профілів та проектування відповідного технологічного оснащення необхідне рішення задачі жорсткопластичного згину штаби, навантаженої осьовою силою і згинальним моментом.

### Результати

При теоретичному аналізі процесу деформування штаби використані гіпотези і припущення, які застосовуються при дослідженнях жорсткопластичного згину і засновані на деформаційній теорії пластичності. Використовується гіпотеза плоских перерізів. Прийнято, що напружено-деформований стан штаби плоский. Осьові напруження від попереднього розтягу  $\sigma_z$  і тангенціальні напруження від дії згинального моменту  $\sigma_\phi$  є головними, радіальні напруження не враховуються. Осьові напруження розтягу не перевищують границі текучості матеріалу заготовки для запобігання її неконтрольованого

розтягу. Використано умову пластичності Тріска–Сен-Венана.

В якості характеристики деформованого стану штаби при згині прийнята відносна деформація поздовжнього волокна в окружному напрямку, пропорційна кривизні згину та відстанню до нейтрального шару.

Поставлена задача розглядалася для ідеального жорсткопластичного матеріалу з лінійним зміцненням.

При навантаженні штаби попередньою силою розтягу, коли поздовжні напруження розтягу  $\sigma_Z$  менші границі текучості, а потім згинається, то пластичні деформації в стиснутій зоні виникають раніше, ніж у розтягнутій, та при меншій кривизні. Це обумовлено тим, що у стиснутій зоні діють напруження різного знаку: тангенціальні напруження стиску  $\sigma_c$  від згину та напруження розтягу від поздовжньої сили  $\sigma_Z$ , а в розтягнутій зоні діють напруження одного знаку: тангенціальні напруження розтягу  $\sigma_p$  від згину та напруження розтягу від поздовжньої сили  $\sigma_Z$  (рис. 2).

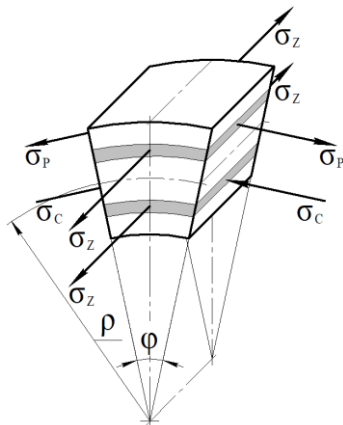


Рис. 2. Схема напружень, які діють на одиничний елемент штаби

Схема деформацій і напружень одиничного елемента штаби із матеріалу з лінійним зміцненням при жорсткопластичному згині і положення нейтрального шару напружень представлена на рис. 3.

Аналіз закономірностей жорсткопластичного згину штаби проводився у відносних безрозмірних величинах  $\tilde{M} = f(\tilde{\varphi})$ , де  $\tilde{M} = M/M_T$  – відносний згинальний момент;  $\tilde{\varphi} = \varphi/\theta$  – відносна кривизна згину;  $\varphi = 1/\rho$  – кривизна згину,  $\rho$  – радіус нейтрального шару;  $\theta = 2\sigma_T/EH$  – найбільша кривизна пружного згину;  $M_T = \sigma_T H^2/6$  – найбільший момент пружного згину штаби одиничної довжини,  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу штаби,  $H$  – тов-

щина штаби,  $E$  – модуль нормальної пружності матеріалу штаби;  $\tilde{\sigma}_Z = \sigma_Z/\sigma_T$  – відносні напруження розтягу.

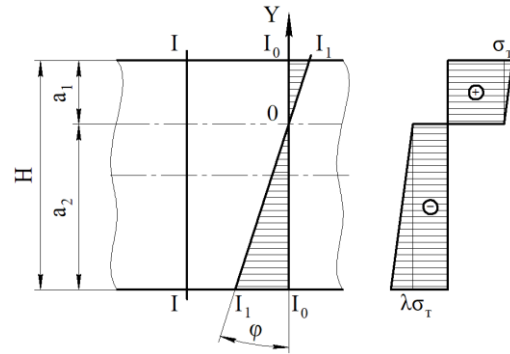


Рис. 3. Схема деформацій і напружень при жорсткопластичному згині штаби з поздовжнім розтягом

Для жорсткопластичного матеріалу з лінійним зміцненням залежність напружень від деформацій апроксимована функцією при  $\varepsilon \geq \varepsilon_T$ ,  $\sigma = \sigma_T + \Pi(\varepsilon - \varepsilon_T)$ , де  $\Pi$  – модуль зміцнення матеріалу,  $\tilde{\Pi} = \Pi/E$  – відносний модуль зміцнення матеріалу.

Напруження в поперечному перерізі штаби:

у розтягнутій зоні  $\sigma = \sigma_T + \Pi\varphi y$ ;

у стиснутій зоні  $\sigma = \lambda\sigma_T + \Pi\varphi y$ ,

де  $\lambda = (1 - \tilde{\sigma}_Z)$  – коефіцієнт, що враховує вплив поздовжніх напружень розтягу,

$\tilde{\sigma}_Z = \sigma_Z/\sigma_T$  – відносні напруження розтягу.

Положення нейтрального шару напружень визначалося із умови рівноваги внутрішніх сил

$$\int_0^{a_1} (\sigma_T + \Pi\varphi y) dy - \int_0^{a_2} (\lambda\sigma_T + \Pi\varphi y) dy = 0.$$

Після інтегрування та перетворень координати нейтрального шару

$$\begin{aligned} \tilde{a}_1 &= \frac{\lambda + \tilde{\varphi}\tilde{\Pi}}{1 + \lambda + 2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}}, \\ \tilde{a}_2 &= \frac{1 + \tilde{\varphi}\tilde{\Pi}}{1 + \lambda + 2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\tilde{a}_1 = a_1/H$ ,  $\tilde{a}_2 = a_2/H$  – координати положення нейтрального шару у відносних величинах.

На рис. 4. згідно отриманої залежності (1) наведено графік залежності положення відносного нейтрального шару напружень  $\tilde{a}_2$  від відносної кривизни згину  $\tilde{\varphi}$  та коефіцієнту, що враховує вплив поздовжніх напружень розтягу  $\lambda$ , (відносний модуль зміцнення матеріалу штаби  $\tilde{\Pi} = 0,07$ ).

При визначеному положенні нейтрального шару напружень відносний згинальний момент, необхідний для згинання штаби з поздовжнім розтягом, визначається за умови рівноваги зовнішніх і внутрішніх сил

$$M = \int_0^{a_1} (\sigma_T + \Pi \varphi y) y dy + \int_0^{a_2} (\lambda \sigma_T + \Pi \varphi y) y dy$$

Після інтегрування та перетворень відносний згинальний момент

$$\tilde{M} = 3(\tilde{a}_1^2 + \lambda \tilde{a}_2^2) + 2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}(\tilde{a}_1^3 + \tilde{a}_2^3).$$

Враховуючи значення  $\tilde{a}_1$  і  $\tilde{a}_2$ , відносний згинальний момент

$$\begin{aligned} \tilde{M} = & 3 \left( \left( \frac{\lambda + \tilde{\varphi}\tilde{\Pi}}{1 + \lambda + 2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}} \right)^2 + \lambda \left( \frac{1 + \tilde{\varphi}\tilde{\Pi}}{1 + \lambda + 2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}} \right)^2 \right) + \\ & + 2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi} \left( \left( \frac{\lambda + \tilde{\varphi}\tilde{\Pi}}{1 + \lambda + 2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}} \right)^3 + \left( \frac{1 + \tilde{\varphi}\tilde{\Pi}}{1 + \lambda + 2\tilde{\varphi}\tilde{\Pi}} \right)^3 \right). \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 5. згідно отриманої залежності (2) наведено графік залежності відносного згинального моменту  $\tilde{M}$  від відносної кривизни згину  $\tilde{\varphi}$  та коефіцієнту, що враховує вплив поздовжніх напружень розтягу  $\lambda$ , (відносний модуль зміцнення матеріалу штаби  $\tilde{\Pi} = 0,07$ ).

Аналітичні залежності, одержані при розв'язанні задач жорсткопластичного згину штаби, використовувалися при розробці методу розрахунку

параметрів технологічного процесу виготовлення тонкостінних профілів гнуттям з поздовжнім розтягом.

Як випливає з теореми про пружне розвантаження стосовно пружнопластичного згину штаби, зменшення її кривизни після розвантаження пропорційно згинальному моменту. Дане твердження може бути застосовне і до жорсткопластичного згину штаби. Тому, якщо залежність між згинальним моментом і кривизною представлена у відносних величинах  $\tilde{M} = f(\tilde{\varphi})$ , то відносне пружинення  $\Delta\tilde{\varphi}$  дорівнює відносному згинальному моменту

$$\Delta\tilde{\varphi} = \tilde{\varphi} - \tilde{\varphi}_0 = \tilde{M},$$

де  $\tilde{\varphi}_0$  – відносна залишкова кривизна штаби.

Отже, відносна залишкова кривизна після розвантаження

$$\tilde{\varphi}_0 = \tilde{\varphi} - \tilde{M}. \quad (3)$$

Аналітичні залежності (2, 3) дозволяють визначати відносний згинальний момент, пружне пружинення і залишкову кривизну при різних напруженнях розтягу і модулі зміцнення в межах прийнятих кривизн згину. Таким кривизнам відповідають відносні радіуси згину штаби від 5 до 100.

Будь-яка форма поперечного перерізу профілю може бути представлена як сполучення плоских та криволінійних ділянок. Для визначення сукупних силових дій на заготовку необхідний послідовний силовий та геометричний розрахунок кожної криволінійної ділянки (рис. 6).

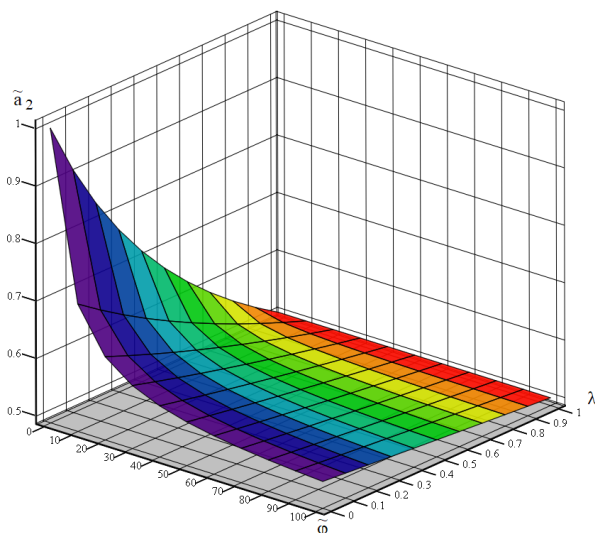


Рис. 4. Залежність положення відносного нейтрального шару напружень  $\tilde{a}_2$  від відносної кривизни згину  $\tilde{\varphi}$  та коефіцієнту, що враховує вплив поздовжніх напружень розтягу  $\lambda$ , (відносний модуль зміцнення матеріалу штаби  $\tilde{\Pi} = 0,07$ )

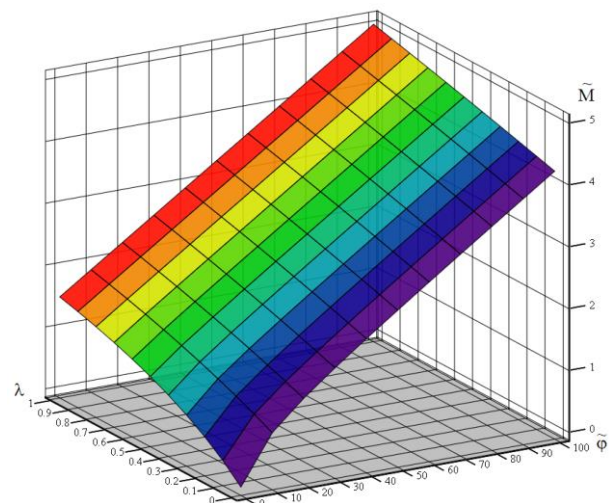


Рис. 5. Залежність відносного згинального моменту  $\tilde{M}$  від відносної кривизни згину  $\tilde{\varphi}$  та коефіцієнту, що враховує вплив поздовжніх напружень розтягу  $\lambda$ , (відносний модуль зміцнення матеріалу штаби  $\tilde{\Pi} = 0,07$ )

Вихідними параметрами для розрахунку параметрів процесу виготовлення профілю та розрахунку геометричних параметрів технологічного оснащення є: товщина  $H$  та ширина  $B$  заготовки, границя текучості  $\sigma_T$ , модуль пружності  $E$ , відносний модуль зміцнення матеріалу  $\tilde{P}$ , кут між полицями  $\beta_0$  (рис. 6), радіус згину  $R_0$ , також необхідно знати коефіцієнт тертя матеріалу заготовки  $f$  по поверхням штампів кінцевих захватів, відносні напруження розтягу  $\tilde{\sigma}_Z$ , або коефіцієнт, що враховує вплив поздовжніх напружень розтягу  $\lambda$ .

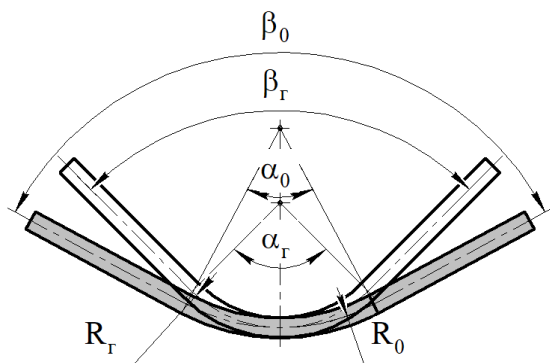


Рис. 6. Схема згину ділянки профілю

Допоміжні розрахункові дані: залишковий радіус кривизни  $R_0$ , найбільший радіус пружного вигину  $R_y = HE/2\sigma_T$ , залишкова відносна кривизна  $\tilde{\varphi}_0 = R_y/R_0$ , найбільший момент пружного вигину одиничного елемента  $M_T = \sigma_T H^2/6$ .

Сила розтягу заготовки  $F_Z = \lambda \sigma_T B H$ . Сила притискання штампів кінцевих захватів  $F_{\Pi} = F_Z/2f$ .

Відносний згинальний момент та відносна кривизна гнуття визначаються згідно з рішенням системи рівнянь відносного згинального моменту (2) та пружного розвантаження. Для деформування без розтягу –  $\tilde{M}_r$ ,  $\tilde{\varphi}_r$ , для деформування при дії поздовжнього розтягу –  $\tilde{M}_{rp}$ ,  $\tilde{\varphi}_{rp}$ .

На підґрунті отриманих даних далі визначається потрібні згинальні монети, радіуси кривизни та кути між полицями,

для гнуття без розтягу:

$$\begin{aligned} M_r &= M_T \tilde{M}_r, \\ R_r &= R_y \frac{1}{\tilde{\varphi}_0 + \tilde{M}_r}, \\ \beta_r &= \beta_0 \left( 1 + \frac{\tilde{M}_r}{\tilde{\varphi}_0} \right) - 180^\circ \frac{\tilde{M}_r}{\tilde{\varphi}_0}; \end{aligned}$$

для гнуття з поздовжнім розтягом:

$$\begin{aligned} M_{rp} &= M_T \tilde{M}_{rp}, \\ R_{rp} &= R_y \frac{1}{\tilde{\varphi}_0 + \tilde{M}_{rp}}, \\ \beta_{rp} &= \beta_0 \left( 1 + \frac{\tilde{M}_{rp}}{\tilde{\varphi}_0} \right) - 180^\circ \frac{\tilde{M}_{rp}}{\tilde{\varphi}_0}. \end{aligned}$$

Розрахунок параметрів для налаштування профілювального устаткування, а також розрахунок геометричних параметрів технологічного оснащення для отримання відповідної конфігурації профілю є достатньо трудомістким завданням, яке передбачає отримання сумісного рішення задачі жорсткопластичного згину штаби з поздовжнім розтягом та рівняння пружного розвантаження для кожної криволінійної ділянки профілю.

Спеціалізованого програмного забезпечення для вирішення подібних задач не існує, а використання систем Mathcad та подібних, не дозволяє добитися швидкості і зручності отримання результатів та вимагає наявності ліцензії.

Для вирішення цієї проблеми було прийнято рішення розробки власного відповідного програмного забезпечення. З метою досягнення зручності користування та мобільності для реалізації було обрано Flutter. Flutter – комплект засобів розробки та фреймворк, розроблений корпорацією Google для створення мобільних додатків, а також додатків для настільних комп'ютерів.

В результаті було розроблено мобільний додаток, який дозволяє проводити розрахунки параметрів, що необхідні для налаштування профілювального устаткування, сили затискання заготовки в кінцевих затискачах  $F_{\Pi}$  та сили попереднього розтягу штабової заготовки  $F_Z$ , (рис. 1), а також розрахунки геометричних параметрів кінцевих затискачів та профілювальних роликів для отримання відповідної конфігурації профілю (рис. 6).

Для профілів, які мають декілька криволінійних ділянок з різними геометричними параметрами, розрахунок проводиться послідовно для кожної ділянки.

Перший екран додатку передбачає введення розмірів перерізу штабової заготовки (ширина і товщина) та механічних властивостей її матеріалу (границя текучості, модуль пружності, відносний модуль зміцнення) (рис. 7 а).

Другий екран – введення геометричних характеристик ділянки профілю, що розраховується (внутрішній радіус і кут між полицями), а також, деякі характеристики профілювального устаткування, необхідні для проведення розрахунків (відносні напруження розтягу і коефіцієнт тертя матеріалу штабової заготовки в кінцевих затискачах) (рис. 7 б).

На третьому екрані (рис. 8) виводяться результати розрахунків:

1) для налаштування профілювального устаткування – сила затискання кінцевих ділянок заготовки і сила попереднього розтягу штабової заготовки;

2) для проектування кінцевих затискачів і профілювальних роликів – геометричні характеристики для отримання потрібної форми ділянки профілю, що виготовляється (кути між полицями та внутрішні радіуси згину).

### Висновки

1. Проаналізовано напружено-деформований стан штаби з матеріалу з лінійним зміцненням при її жорсткопластичному згині з поздовжнім пружним розтягом.

2. Визначено положення нейтрального шару напружень у поперечному перерізі.

3. Отримано залежності для визначення відносного згинального моменту, необхідного для згинання штаби з поздовжнім розтягом.

4. Наведено аналітичні залежності, що дозволяють визначати пружне пружинення і залишкову кривизну.

5. Для спрощення практичних розрахунків розроблено власне програмне забезпечення. Застосування розробленого додатку дозволить кардинально скоротити час на технологічну підготовку виробництва тонкостінних профілів гнуттям з поздовжнім розтягом за рахунок автоматизації розрахунків гео-

метричних параметрів технологічного оснащення та силових параметрів профілювального устаткування.

**Внесок авторів:** формулювання проблеми, організація роботи колективу – **А. В. Новошицький**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **А. В. Новошицький, С. Ж. Боду**; рішення задачі жорсткопластичного згину штаби при дії на неї поздовжнього навантаження розтягу – **Д. В. Фабріційс, С. Ж. Боду, О. Л. Ніколаєв**, визначення залежностей для розрахунку параметрів процесу виготовлення профілю та розрахунку геометричних параметрів технологічного оснащення – **О. П. Шумілов, О. Л. Ніколаєв**, розробка програмного забезпечення – **Д. В. Фабріційс, О. П. Шумілов**.

### 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.

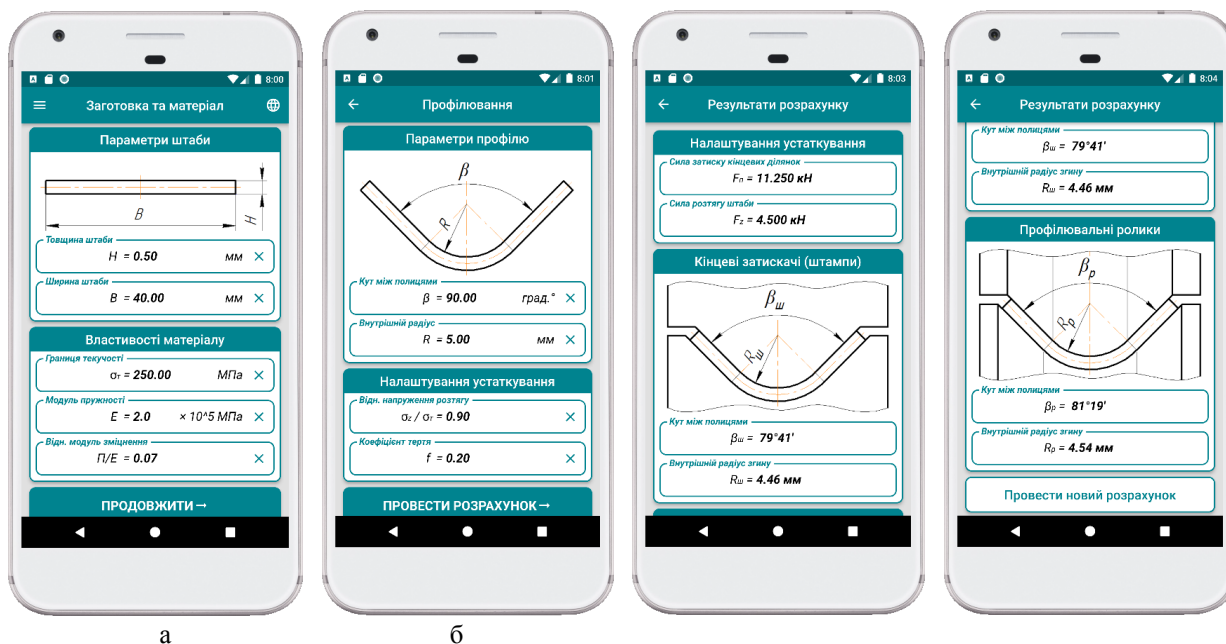


Рис. 7. Екрани введення даних для розрахунку  
а – характеристики заготовки та її матеріалу;  
б – характеристики ділянки профілю та профілювального устаткування

Рис. 8. Екран з результатами розрахунків

### Використання штучного інтелекту

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

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

### Література

1. Новошицький, А. В. *Технология изготовления тонкостенных гнутых элементов теплообменных аппаратов ГТУ гибкой с продольным растяжением* [Текст] / А. В. Новошицький // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2009. – № 4/5 (40). – С. 42-45.
2. Новошицький, А. В. *Удосконалена технологія та устаткування для виготовлення тонкостінних профільованих деталей теплообмінних апаратів* [Текст] / А. В. Новошицький, С. Ж. Боду, & Д. В. Фабріциєв // *Сучасний стан та проблеми двигунобудування : Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції*. – 2024. – С. 154-156.
3. Пат. UA 44451 Україна. *Спосіб виготовлення гнутих профілів* [Текст] / С. М. Соловійов, & А. В. Новошицький – № 2001031674 ; заявл. 12.03.2001; опубл. 15.02.2002. – Бюл. № 2.
4. Пат. UA 79280 Україна. *Спосіб виготовлення гнутих профілів із складною позовжньою кривизною* [Текст] / С. М. Соловійов, & А. В. Новошицький. – № 20041008669 ; заявл. 25.10.2004; опубл. 11.06.2007. – Бюл. № 8.
5. Пат. UA 79279 Україна. *Спосіб виготовлення гнутих профілів з позовжніми криволінійними гофрами* [Текст] / С. М. Соловійов, & А. В. Новошицький. – № 20041008666 ; заявл. 25.10.2004; опубл. 11.06.2007. – Бюл. № 8.
6. 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.
7. Пат. UA 55030 Україна. *Спосіб виготовлення гнутих профілів з позовжньою кривизною* [Текст] / С. М. Соловійов, & А. В. Новошицький. – № 2002064966 ; заявл. 17.06.2002; опубл. 17.03.2003. – Бюл. № 3.
8. Пат. UA 43149 Україна. *Розтяжна машина* [Текст] / С. М. Соловійов, & А. В. Новошицький. – № 2001031675 ; заявл. 12.03.2001; опубл. 15.11.2001. – Бюл. № 10.

9. Пат. UA 55029 Україна. *Розтяжна машина* [Текст] / С. М. Соловійов, & А. В. Новошицький. – № 2002064965 ; заявл. 17.06.2002; опубл. 17.03.2003. – Бюл. № 3.

### References

1. Novoshytskyi, A. V. *Tehnologija izgotovleniya tonkostennykh gnutykh jelementov teploobmennyykh apparatov GTU gibkoj s prodol'nym rastjazheniem* [Technology of manufacturing thin-walled bent elements of heat exchangers of gas turbines by flexible longitudinal stretching]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2009, no 4/5 (40), pp. 42-45.
2. Novoshytskyi, A. V., & Bodu, S. Z., Fabritsyiev D. V. *Udoskonalena tekhnolohiya ta ustatkuvannya dlya vyhotovlennya tonkostinnykh profil'ovanykh detaley teploobminnykh aparativ* [Advanced technology and equipment for the production of thin-walled profiled parts for heat exchangers] *Current state and problems of engine engineering*, 2024, pp. 154-156.
3. Solovyov, S. M., & Novoshytskyi, A. V. *Sposib vyhotovlennya hnutykh profiliv* [Method of manufacturing bent profiles]. Patent UA № 44451, 2002.
4. Solovyov, S. M., & Novoshytskyi, A. V. *Sposib vyhotovlennya hnutykh profiliv iz skladnoyu pozdovzhn'oyu kryvyznoyu* [Method for manufacturing bent profiles with complex longitudinal curvature]. Patent UA № 79280, 2007.
5. Solovyov, S. M., & Novoshytskyi, A. V. *Sposib vyhotovlennya hnutykh profiliv z pozdovzhnimy kryvoliniynymy hoframy* [Method for manufacturing bent profiles with longitudinal curved corrugations]. Patent UA № 79279, 2007.
6. Solovyov, S. M., & Novoshytskyi, A. V. *Sposib vyhotovlennya ryflenykh profiliv* [Method of manufacturing corrugated profiles]. Patent UA № 79278, 2007.
7. Solovyov, S. M., & Novoshytskyi, A. V. *Sposib vyhotovlennya hnutykh profiliv z pozdovzhn'oyu kryvyznoyu* [Method for manufacturing bent profiles with longitudinal curvature]. Patent UA № 55030, 2003.
8. Solovyov, S. M., & Novoshytskyi, A. V. *Roztyazhna mashyna* [Stretching machine]. Patent UA № 43149, 2001.
9. Solovyov, S. M., & Novoshytskyi, A. V. *Roztyazhna mashyna* [Stretching machine]. Patent UA № 55029, 2003.

Надійшла до редакції 20.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

### CALCULATION OF PARAMETERS OF PROFILING TECHNOLOGY WITH LONGITUDINAL TENSION OF THIN-WALLED PARTS OF HEAT EXCHANGERS

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

Plate heat exchangers are produced at specialized enterprises using powerful press equipment and special stamping equipment. Heat exchangers are heat transfer elements that transfer heat between two media. The shape and dimensions of the heat exchangers are selected based on the physical properties of the coolants and their move-

ment. Traditional technologies for profiling heat transfer elements by stamping are energy-intensive and, in some cases, cannot ensure the quality of heat exchangers made of high-strength alloy steels, aluminum, and copper alloys. In modern conditions, it may be rational to produce heat-transfer thin-walled profile elements based on the technology of profiling by local force with longitudinal tension, which allows the production of a variety of thin-walled profiles with the necessary accuracy and dimensional stability. This study aims to develop an engineering methodology for calculating force parameters for adjusting profiling equipment and determining the geometric parameters of technological equipment. It is possible to obtain the necessary dependencies when solving the rigid-plastic bending problem of a staff under the action of a longitudinal tensile load. In the theoretical analysis of the process of staff deformation, hypotheses and assumptions were used that are used in the study of rigid-plastic bending and are based on the deformation theory of plasticity. The hypothesis of the plane sections is used. This problem was considered for an ideal rigid-plastic material with linear reinforcement. The results obtained: the stress-strain state of a staff made of a material with linear reinforcement during its rigid-plastic bending with longitudinal elastic tension was analyzed. The position of the neutral stress layer in the cross-section was determined. Dependencies were obtained to determine the relative bending moment required for bending the staff with longitudinal tension. Analytical dependencies that allow determining elastic springback and residual curvature were obtained. Software was developed for practical calculations of geometric parameters of technological equipment and power parameters of profiling equipment.

**Keywords:** heat exchangers; manufacturing technology; bending with longitudinal tension; rigid-plastic bending; longitudinal tension; calculation of parameters.

**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.

**Фабріцис 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.