

**Вакуленко Р. А.**  
к.т.н., доцент

**Саленко Ю. С.**  
д.т.н., професор

*Кременчуцький  
національний університет  
імені Михайла  
Остроградського*

**Ікальчик М.І.**  
к.т.н., доцент

*Відокремлений підрозділ  
Національного  
університету біоресурсів і  
природокористування  
України «Ніжинський  
агротехнічний інститут»*

**Vakulenko R.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor

**Salenko Y.**  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor

*Mikhailo Ostrohradskyi  
Kremenchuk National  
University*

**Ikalchik M.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor

*Separated subdivision of the  
National University of  
Bioresources and Nature  
Management of Ukraine  
"Nizhyn Agrotechnical  
Institute"*

РОЗРАХУНОК ТА ВИГОТОВЛЕННЯ  
ОСНАСТКИ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО  
РОЗВАЛЬЦЮВАННЯ УДАРОМ  
ТВЕРДОГО ТІЛА © 2026 by Вакуленко Р. А., Саленко Ю. С.,  
Ікальчик М.І., is licensed under CC BY 4.0

**УДК 621.791.76.044.2**

**DOI: 10.37128/2306-8744-2026-2-8**

## **РОЗРАХУНОК ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО РОЗВАЛЬЦЮВАННЯ УДАРОМ ТВЕРДОГО ТІЛА**

У статті при вивченні роздачі локальної ділянки труби прийнято такі припущення: його деформований плоский стан, максимальні деформації – тангенціальні, що визначаються співвідношенням діаметра до і після деформації; деформування трубної решітки на локальній ділянці відбувається як введення лінійного пуансону у напівпростір. Проведено балістичний та міцнісний розрахунки технологічних установок при їх проектуванні. На етапі експериментальних досліджень було використано для розвальцювання пристрілювальний пістолет ПЦ-84, що застосовується в будівельній справі для пробивання отворів у залізобетонних балках, для пристрілювальних робіт за допомогою дюбелів. Основна увага була приділена розробці конструкції технологічного оснащення. Запропоновано пуансон, як вигляді розрізної цанги, і у вигляді окремих сегментів, перевагу віддано другій схемі. Встановлено, що велику кількість пазів у цанзі виконувати не можна, так як це призведе до збільшення огранювання, і, отже, зниження якості кріплення. Розрахунки міцності пелюсток цанг показали, що при малій кількості пазів в їх корені реалізуються високі згинальні напруження, що різко знижує стійкість цанг. Наведена конструктивна схема технологічного оснащення для розвальцювання. Виконано робочу документацію та виготовлено оснастку для кріплення труб, яка надалі використовувалася при відпрацюванні технології з'єднання труб із трубними решітками. Виконані експериментальні дослідження на фрагментах трубних решіток. Виконано аналіз енергетичних можливостей. Визначено дослідним шляхом, що варіюючою величиною заряду, можна обробляти монтажним пістолетом ПЦ 84. Наведено відносні величини огранювання при різних конструктивних виконаннях сегментів пуансону та параметрах з'єднання. Виявлено, що зі збільшенням кількості сегментів різко зростає стійкість комплексу оснастки (інструменту). Механічну обробку цих поверхонь сегмента виконано в зборі з оправкою в робочому положенні (у зазор, що утворився, по діаметральним площинам сегментів для забезпечення якісної механообробки встановлювали пластини відповідної товщини).

**Ключові слова:** кількість пазів, розрахунки міцності, з'єднання труб, лінійний пуансон, монтажний пістолет.

**Вступ.** Використання високих швидкостей застосування деформуючого навантаження дозволяє не тільки скоротити машинний час розвальцювання (в десятки та сотні разів), але й створити обладнання невеликої маси та габаритів.

**Аналіз останніх досліджень.** Імпульсний характер навантаження оброблюваних тиском деталей істотно позначається на конструктивному виконанні технологічного оснащення і вимогах, що висуваються до нього.



Головна особливість імпульсної обробки: можна прикласти навантаження до оброблюваної деталі, не створюючи оснастку із замкненою силовою схемою.

Для кожного типорозміру труб і трубної дошки розробляється індивідуальний розрізний пуансон під конкретний діаметр труби, що розвальцьовується [1-4, 8-12]. Розрізний пуансон, сегменти якого можуть переміщатися у радіальному напрямку завдяки внутрішнім поверхням, виконаний з ухилом. Деталь з поверхнею, що сполучається (оправлення) має осьове переміщення, вона розганяється до розрахункових швидкостей бойком технологічного обладнання. Таке технологічне обладнання може використовуватися для широкої номенклатури труб, що обробляються, і трубних дощок. Розвальцьовання кожної труби виконується індивідуально. Енергетичні характеристики обладнання можуть змінюватись у певному діапазоні, межі якого обумовлені ефективністю та надійністю повноти згоряння всього порохового заряду.

#### Мета та завдання дослідження

Проаналізувати вплив кількості сегментів інструменту на можливість формування контактної поверхні відповідно до внутрішнього радіуса труби з урахуванням відносного зазору. Дослідити залежність стійкості комплексу оснастки від кількості сегментів та обґрунтувати вибір раціональної геометрії контактної поверхні сегментів. Обґрунтувати доцільність формування контактної поверхні сегментів за радіусом, що відповідає внутрішній поверхні труби в кінці процесу деформування. Розробити рекомендації щодо технології механічної обробки контактних поверхонь сегментів у зборі з оправкою для забезпечення необхідної точності та якості. Визначити умови використання додаткових елементів (пластин) при механообробці для компенсації зазорів і підвищення якості обробки.

**Матеріали і методи досліджень.** При механічному розвальцьованні необхідно розклинювати протилежний кінець труб для того, щоб запобігти її обертанню разом з інструментом (роликом). Важлива перевага імпульсного способу кріплення труб у трубній дошці полягає в тому, що трубу не потрібно утримувати від поздовжнього та азимутального зміщення. Це зумовлено високою інерційністю самої труби та розтискної сегментної оправки у напрямку удару, оскільки їх сумарна маса в 1...2 рази перевищує масу пуансону, завдяки чому відбувається роздача труби без осьового зсуву [5-7].

Обладнання для локального кріплення труб ударом твердого тіла має забезпечити необхідні для технологічного процесу енергосилові та кінематичні параметри: реалізовану енергію та

швидкість бойка. Швидкість руху інструменту для деформування металу ударом твердого тіла становить десятки метрів за секунду.

Вважаємо, що роздача труби та отвори в трубній дошці здійснюється розтискною сегментною оправкою за рахунок витрати кінетичної енергії пуансона масою  $m$ , придбаної за час руху у стволі високошвидкісного пристрою. Нехтуємо втратами енергії на пружне деформування інструменту через їх малість, тобто вся кінетична енергія пуансона витрачається на деформування труби та дошки.

При вивченні роздачі локальної ділянки труби приймаємо такі припущення: його деформований плоский стан, максимальні деформації – тангенціальні, що визначаються співвідношенням діаметра до і після деформації; деформування трубної решітки на локальній ділянці відбувається як введення лінійного пуансону у напівпростір. Тоді можна використовувати залежність для розрахунків роботи деформування:

для труби:

$$A^m = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_B^m \cdot e_p \cdot \pi d_0 L_\phi \cdot \delta_m \quad (1)$$

де  $\sigma_B^m$  – межа міцності для матеріалу труби, мм;  $d_0$  – зовнішній діаметр труби, мм;

$e_p = \ln \frac{d_{\max}}{d_0}$  – максимальна тангенціальна

деформація труби (у проєктованих процесах її значення не перевищують 0,08...0,10 [13-17]);  $L_\phi$  – ширина локального ділянки кріплення (рекомендовані значення  $L_\phi = 0,3...0,5d_0$ , мм; [13-17]);  $\delta_m$  – товщина стінки труби, мм;

та для дошки:

$$A^d = 4\rho \cdot \sigma_e^d L_\phi d_0^2, \quad (2)$$

де  $\rho$  – ступінь розвальцьовання (її значення не перевищують 1%).

Аналіз результатів розрахунків, проведених за цими залежностями, показав, що для забезпечення кріплення труб діаметром 25...32 мм із товщиною стінки до 2,5 мм із матеріалів з межею міцності на розтяг для труб 380...490 МПа та трубних решіток 580...620 МПа потрібна енергія вбирається у 150...180 Дж (при цьому  $A^m = 50...60$  кДж, а  $A^d = 100...120$  кДж). Відповідно для труб із зовнішнім діаметром до 57 мм із товщиною стінки труби 3,5...4,0 мм потрібна енергія не перевищує  $A_\Sigma \leq 1000$  кДж. Таким чином, при зміні діаметра труби в 2 рази, необхідна для розвальцьовання труб енергія значно збільшується в 2–5 рази [8-12] і, природно, має використовуватися обладнання інших типорозмірів.

Як енергоносіє доцільно використовувати порох. Він має високу енергоємність, обладнання з таким приводом компактне, його металоемність

мінімальна і воно автономне, тому що не залежить від зовнішніх енергоджерел (що особливо важливо при ремонті теплообмінних апаратів без їх демонтажу).

Проведено балістичний та міцнісний розрахунки технологічних установок при їх проектуванні. Балістичному розрахунку піддається система патронник – ствол – бойок. Мета балістичного розрахунку – підбір таких параметрів установок (діаметр і довжина ствола, розміри патронника установки, вага порохового заряду та пуансону), при яких розрахункова швидкість бойка дозволила б реалізувати потрібну енергію деформування для закріплення труби у трубних решітках.

Процес згоряння порошу вважають адіабатичним процесом розширення газу, і залежність для визначення роботи розширення представляють 3 в такому вигляді:

$$W_p = \frac{1}{n-1} P_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_k} \right)^{n-1} \right], \quad (3)$$

де  $P_1$  та  $V_1$  – початковий тиск та обсяг порохових газів, МПа та м<sup>3</sup>;  $V_k$  – швидкість контакту, м/с;  $n$  – показник адіабати.

Початковий тиск порохових газів визначають [5-7] з рівняння внутрішньої балістики:

$$P_1 = f \Delta (1 - \alpha \Delta), \quad (4)$$

де  $\Delta = \alpha / V_1$  – щільність заряджання;  $f$  і  $\alpha$  – коефіцієнти, що залежать від типу порошу, наприклад, для нітрогліцеринового порошу типу мисливського «Сокіл»  $f = (9 \dots 10) \times 10^6$  Нм/Н;  $\alpha = (0,75 \dots 0,85) \times 10^2$  м<sup>3</sup>/Н.

Розрахункова швидкість бойка при використанні порошу «Сокіл» обчислюється за такою формулою:

$$v_p = 3,16 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{1 - \left( \frac{V_1}{V_k} \right)^{0,2} \Delta V_1}{(1 - 0,8 \Delta) m_b}}, \quad (5)$$

де  $m_b$  – маса бойка.

На етапі експериментальних досліджень був використаний для розвальцювання пристрілювальний пістолет ПЦ-84, що застосовується в будівельній справі для пробивання отворів у залізобетонних балках, для пристрілювальних робіт за допомогою дьубелів (рис. 1). У цьому пістолеті використовується калібр патронів діаметром 6,8 мм, які мають різні навішування порошу. Реалізовані швидкості бойків (ударників) 40...70 м/с, маси зарядів безпульних індустриальних патронів калібру 6,8 мм 0,2...0,43 г, а енергія від 548 до 1174 Дж.



Рис. 1. Монтажний пістолет ПЦ-84 та патрони до нього

Основна увага була приділена розробці конструкції технологічного оснащення. З розглянутих важливих схем, у яких запропоновано пуансон, як вигляді розрізної цанги, і у вигляді окремих сегментів, перевагу віддано другій схемі. Недоліки першої схеми є очевидними. Перш за все, при розвальцюванні формується більш значне огранювання поверхонь оброблюваних деталей, що сполучаються: пази в цангі (при фрезеруванні), багато в чому обумовлюють огранювання, матимуть ширину, порівнянну з товщиною стінки труби, тоді як при використанні сегментів зазорів на робочій поверхні (у вихідному положенні) взагалі можна уникнути. Крім того, велика кількість пазів у цанзі виконувати не можна, так як це призведе до збільшення огранювання, і, отже, зниження якості кріплення.

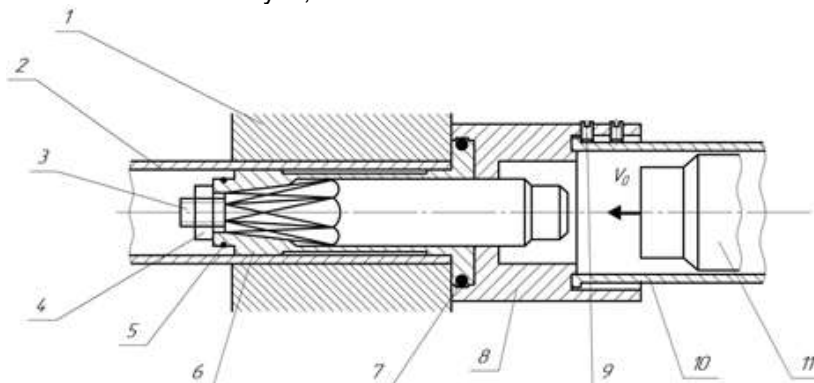
При малій кількості пазів (6...8 штук), як показали розрахунки міцності пелюсток цанг, в їх корені реалізуються високі згинальні напруги, що різко знижує стійкість цанг. До того ж, цанги практично непридатні при малій товщині трубної дошки та значних радіальних переміщеннях робочих поверхонь інструменту. Тому основна перевага такої схеми – простота виготовлення пуансону – не може превалювати над недоліками.

З урахуванням наведених вище зауважень конструктивна схема технологічного оснащення (рис. 2) виконана за другою принциповою схемою, пуансон складається з сегментів.

У трубі 2 (для її кріплення в дошці 1) встановлюють у зборі технологічне оснащення. Вона включає оправку 3, на якій змонтовані сегменти пуансона 6, стягнуті стопорними кільцями 5 і 7. Центрівка соударяемых деталей: оправки 1 і бойка ударної 11 колонки забезпечується завдяки перехіднику 8, співвісність якого забезпечується перехідною посадкою сполучних поверхонь оправки 1. Перехідник кріпиться на стволі 10 ударної колонки за допомогою гвинтів 9. Розгін бойка колонки здійснюється на довжині 20...25 мм.

При його ударі по оправці остання розтискає стопорні кільця і переміщає сегменти пуансона в радіальному напрямку, від осьового зміщення їх запобігає буртику, що упирається в передню стінку трубної дошки. Сегменти пуансона в зоні тильної сторони дошки мають локальні виступи, якими

здійснюється деформування труби, а в подальшому і дошки. Спряжені поверхні у оправки і сегментів пуансона термооброблені та виконані похилими, кут нахилу виконаний 1:7, що виключає самогальмування оправки та сегментів.



1 – трубна дошка, 2 – труба, 3 – оправка, 4 – гайка, 5 – стопорне кільце, 6 – сегменти пуансона, 7 – стопорне кільце, 8 – перехідник, 9 – гвинти стяжні, 10 – ствол ударної колонки монтажного пістолета, 11 – бойок ударної колонки монтажного пістолета

**Рис. 2. Конструктивна схема технологічного оснащення для розвальцювання**

Коефіцієнт тертя за загартованим поверхням не перевищує 0,1. Питомі зусилля вдавлювання пуансона трубну дошку (через трубу) перевищують межу плинності матеріалу оброблюваних деталей, тому інструмент виготовили з вуглецевої інструментальної сталі У8А, з подальшою термообробкою. Інструмент, виконаний з цієї сталі має високу ударостійкість і міцність, але не експлуатується в місцях можливого нагріву. Площі контакту поверхонь, що сполучаються оправки і сегмента пуансона, а також зовнішньої поверхні виступів пуансона (якими і здійснюється деформування труби) близькі завдяки більшій довжині контакту по внутрішній поверхні.

Відповідно до конструктивної схеми технологічного оснащення виконано робочу документацію та виготовлено оснастку для кріплення труб діаметром 25 мм з товщиною стінки 2 мм у трубній дошці товщиною 25...50 мм (рис. 4.3, рис 4), яка надалі використовується при відпрацюванні технології з'єднання труб із трубними решітками.



**Рис. 3. Технологічна оснастка для розвальцювання подетально та зварювання вибухом труб з трубними решітками**



**Рис. 4. Технологічна оснастка для розвальцювання труб у трубних решітках у зборі**

Експериментальні дослідження виконані на фрагментах трубних решіток: матеріал труби – сталь Ст3:  $\sigma_t = 250$  МПа,  $\sigma_s = 450$  МПа; матеріал трубної решітки – сталь 45:  $\sigma_t = 360$  МПа,  $\sigma_s = 580$  МПа; вибраний радіальний зазор 1,5 мм.

Робота деформування труби, розрахована за залежністю (1), не перевищуватиме 80 кДж, а робота спільного деформування при вдавлюванні у трубні решітки обчислена за залежністю (2) не перевищує 160 кДж для вибраних матеріалів труби та трубної решітки. Виконаний аналіз енергетичних можливостей показав, що кінетичної енергії бойка при швидкості до 50 м/с цілком достатньо для локального кріплення труби на довжині 12 мм за розвальцювання  $\rho = 1...1,2\%$  [1-4].

Дослідним шляхом визначено, що варіюючою величиною заряду, можна обробляти монтажним пістолетом ПЦ 84 труби

діаметром 20...25 мм і товщиною стінки 0,5...3 мм, а ударною колонкою УК-6 труби діаметром до 35...40 мм і товщиною стінки до 3... 3,5 мм.

Огранювання отвору труби, що вальцюється, обумовлена неточністю форми інструменту, можлива, якщо контактна поверхня інструменту буде виконана по вихідному радіусу внутрішнього отвору.

Цю величину огранювання можна оцінити, проаналізувавши кінематику (величини реальних переміщень сегментів) частин розрізного пуансону та геометрію його контактних поверхонь. Якщо остання виконана з радіусом  $r_o$ , що дорівнює внутрішньому радіусу труби, то у вихідному положенні вона займає положення  $\cup ADC$  (рис. 5). Стріла прогину поверхні сегмента буде

$$f_o = r_o(1 - \cos \alpha) = r_o \left(1 - \cos \frac{\pi}{N}\right) \quad (6)$$

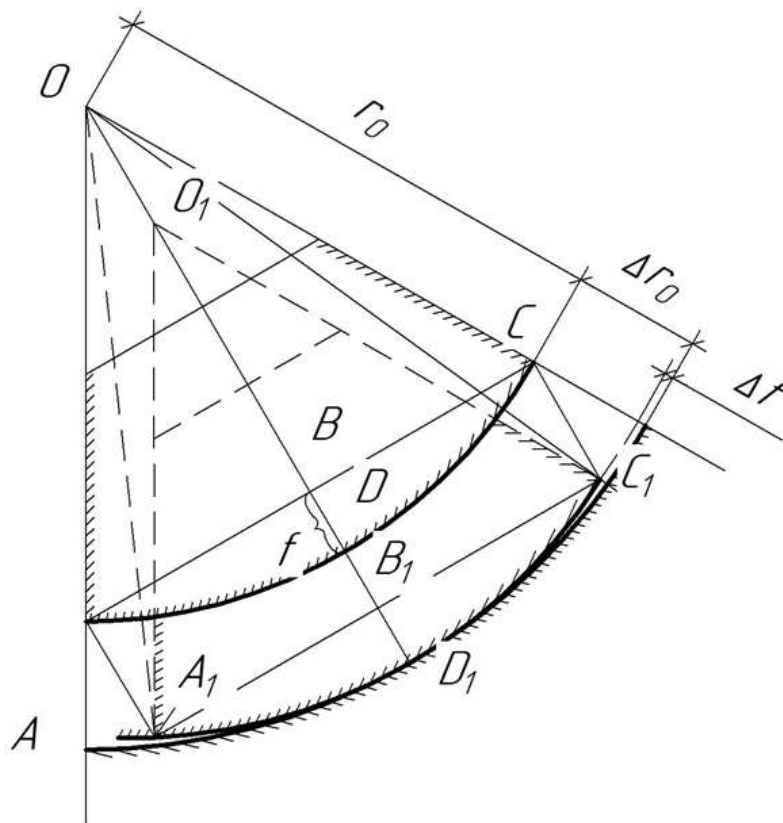


Рис. 5. Схема переміщення сегмента розрізного пуансону

Стріла прогину внутрішньої поверхні труби в секторі, що займає сегмент наприкінці процесу розвальцювання (тобто у куті  $\angle A_1OC_1$ ), дорівнюватиме  $f_k = (r_o + \Delta r) (1 - \cos \angle A_1OD_1)$ ,

де  $\angle A_1OD_1 = \angle AOD - \angle AOA_1 \approx \pi/N (1 - \varepsilon - \rho)$ .

Після перетворень (скориставшись виразами для косинуса різниці кутів і для розкладання в ряд синуса малих кутів)

де  $r_o$  – внутрішній радіус труби, мм;  $N$  – кількість сегментів розрізного пуансону, шт.

Радіальне переміщення  $DD_1$  можна уявити в такому вигляді:

$$\Delta r = r_o' - r_o \approx r_o (\varepsilon_{rr}' + \rho) \quad (7)$$

де  $\varepsilon_{rr}' = \frac{r' - r_o}{r_o}$  – відносна меридіальна

деформація труби момент початку розвантаження;  $\rho$  – ступінь розвальцювання.

Для технології з'єднання труб з трубними решітками після розрахунків відносна деформація труби в момент початку розгону, і ступінь розвальцювання становлять порядку  $\varepsilon_r' = 0,08...0,1$  і  $\rho = 0,01...0,015$ , відповідно.

Абсолютною величиною утонення стінки труби, яке мало в порівнянні з величиною радіального переміщення, при аналізі нехтуємо.

отримаємо вираз для стріли прогину в такому вигляді:

$$f_k = (r_o + \Delta r) \left[ \left(1 - \cos \frac{\pi}{N}\right) + \frac{\pi}{N} (\varepsilon_r + \rho) \sin \frac{\pi}{N} \right] \quad (8)$$

Тоді величину огранювання (прийнята як різниця стріли прогину сегмента і всередині



відповідної ділянки труби  $\Delta f = f_o - f_k$ ) можна оцінити залежно

$$\Delta f = \Delta r \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{N} + \frac{\pi}{N} (\varepsilon_r + \rho) \sin \frac{\pi}{N} \right], \quad (9)$$

Для забезпечення щільного з'єднання радіальні переміщення поверхні отвору трубної дошки  $\Delta R_o = \rho R_o$  повинні перевищувати величину огранювання в 1,5...2,5 рази

$$\Delta f \approx 0,5 \Delta R_o \approx 0,5 \rho (r_o + \Delta r + \delta) \quad (10)$$

Величину ступеня розвальцювання, яке могло б компенсувати огранювання можна визначити із залежності

$$\rho = \frac{\Delta r}{(r_o + \Delta r + \delta)} \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{N} + \frac{\pi}{N} (\varepsilon_r + \rho) \sin \frac{\pi}{N} \right]. \quad (11)$$

Аналіз залежності показав, що при розрахункових параметрах з'єднання труб для нової технології  $\varepsilon_r' = 0,08 \dots 0,10$ ,  $N = 4 \dots 6$  ступінь розвальцювання зазвичай  $\rho = 2\%$  отримати щільну сполуку не можна через огранювання, зумовлене геометрією контактної поверхні пуансона, тому при значній мірі розвальцювання необхідно контактну поверхню пуансона виконувати за внутрішнім радіусом труби на початку розвантаження.

У таблиці 1 наведено відносні величини огранювання  $\gamma = \Delta f / r_o$  (де  $\Delta f$  – різниця стріли прогину сегмента оснастки та всередині відповідної ділянки труби, мм;  $r_o$  – внутрішній радіус труби, мм) при різних конструктивних виконаннях сегментів пуансону та параметрах з'єднання.

Таблиця 1

**Залежність величини огранювання оснастки та ступеня розвальцювання від кількості сегментів оправки та відносного зазору при розвальцюванні ударом твердого тіла**

Параметри з'єднання	Кількість сегментів (N)					
	4		6		8	
	Відносний зазор $\Delta r / r_o$					
	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10
Можливе огранювання $\gamma = \Delta f / r_o$	0,0169	0,0347	0,078	0,0161	0,0031	0,0065
Мінімальний ступінь розвальцювання $\rho$ , %	3,5	8,5	1,6	3,7	0,6	1,5

#### Висновки:

1. Аналіз отриманих результатів показав, що контактну поверхню сегментів (інструменту) можна виконувати за внутрішнім радіусом труби тільки при великій кількості сегментів  $N > 8$  з урахуванням відносного зазору  $\Delta r / r_o \approx 0,10$ .

2. Зі збільшенням кількості сегментів різко зростає стійкість комплексу оснастки (інструменту). Тому раціональніше виконати контактну поверхню сегментів з радіусом, відповідним внутрішньої поверхні труби в кінці процесу деформування.

3. Механічну обробку цих поверхонь сегмента виконували в зборі з оправкою в робочому положенні (у зазор, що утворився, по діаметральним площинам сегментів для забезпечення якісної механообробки встановлювали пластини відповідної товщини).

#### Список використаних джерел

1. Anishchenko A., Kukhar V., Artiukh V. and Arkhipova O. Application of G. Lamé's and J. Giellis' formulas for description of shells superplastic forming. *MATEC Web of Conferences*.

2018. Vol. 239. 06007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823906007>

2. Surianinov M., Shyliaiev O., Calculation of plate-beam systems by method of boundary elements. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. 2018. Vol. 7(2). P. 238–241. DOI:[10.14419/ijet.v7i2.23.11927](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11927)

3. Fomin V, Bekirova M., Surianinov M., Fomina I. Nonlinear dynamic analysis of a reinforced concrete frame by the boundary element method. *Materials Science Forum, 968 MSF*. 2019. P. 383–395. DOI:[10.4028/www.scientific.net/MSF.968.383](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.383)

4. Karnaukh S.G., Markov O.E., Aliieva L.I. and Kukhar V.V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 109(9–12). P. 2457–2464. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7>

5. Kukhar V., Balalayeva E., Hurkovska S., Sahirov Y., Markov O., Prysiashnyi A., and Anishchenko O., The Selection of Options for Closed-Die Forging of Complex Parts Using Computer Simulation by the Criteria of Material Savings and Minimum Forging Force. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore:



Springer. 2019. P. 325–331. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8618-3\\_35](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8618-3_35).

6. Shapoval A. and Shapoval A., Development of the unit for multi -stage vibration drawing of metal products. *Tsvetnye Metally*. 2002. Vol. 4. P. 77–82.

7. Hrudkina N.S., Markov O.E., Shapoval A.A., Titov V.A., Aliiev I.S., Abhari P., Malii K.V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion. *FME Transactions*. 2022. Vol. 50(1). P. 90–98. DOI:[10.5937/fme2201090H](https://doi.org/10.5937/fme2201090H)

8. Shapoval O., Vakulenko R., Kulynych V., & Savchenko I. (2024). Tube sheet ligament thickness selection and stress analysis during tube expansion. *Key Engineering Materials*, 1004, 85–91. <https://doi.org/10.4028/p-h2X9dl>

9. Pavlenko D.V., Belokon' Y.O., Tkach D.V. Resource-Saving technology of manufacturing of semifinished products from intermetallic  $\gamma$ -TiAl alloys intended for aviation engineering. *Materials Science*. 2020. Vol. 55(6). P. 908–914. DOI:[10.1007/s11003-020-00386-1](https://doi.org/10.1007/s11003-020-00386-1)

10. Markov O., Khvashchynskyi A., Musorin A., Markova M., Shapoval A. and Hrudkina N. "Investigation of new method of large ingots forging based on upsetting of workpieces with ledges". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 122(3–4). P. 1383–1394. DOI:[10.1007/s00170-022-09989-1](https://doi.org/10.1007/s00170-022-09989-1)

11. Sikulskiy V., Kashcheyeva V., Romanenkov Y., Shapoval A. Study of the process of shapeformation of ribbed doublecurvature panels by local deforming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4(1). P. 43–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108190>

12. Kukhar V, Kostryzhev A, Dykha O, Makovkin O, Kuziev I, Vakulenko R, Kulynych V, Malii K, Butenko E, Hrudkina N, et al. Technological and Chemical Drivers of Zinc Coating Degradation in DX51d+Z140 Cold-Formed Steel Sections. *Metals*. 2026; 16(2):146. <https://doi.org/10.3390/met16020146>

13. Kukhar V., Vasylevskiy O., Khliestova O., Berestovoi I. and Balalayeva E. Hydraulic Press Open Die Forging of 21CrMoV5-7 Steel CCM Roller with Flat Upper and Concave Semiround Lower Cogging Dies. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 489–498. DOI:[10.1007/978-3-030-91327-4\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_48)

14. Kruzhylo O., Volodchenkova N., Maystrenko V., Bolibrukh B., Kalinchyk V.P., Zakora A., Feshchenko A. and Yeremenko S. Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprise. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. Vol. 1(108). P. 35–41. DOI:[10.5604/01.3001.0015.4797](https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.4797)

15. Sereda B., Zherebtsov A., Belokon' Y. The modeling and processes research of titan

aluminides structurization received by SHS technology. *TMS Annual Meeting*. 2010. P. 99–105.

16. Sereda B., Sereda D., Belokon Y., Investigation of corrosion and oxidation of  $\gamma$ -TiAl alloys obtained in self propagating high temperature synthesis. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. 2015. Vol. 2. P. 1249–1255.

17. Khrebtova O., Shapoval O., Markov O., Kukhar V., Hrudkina N. and Rudych M., Control Systems for the Temperature Field During Drawing, Taking into Account the Dynamic Modes of the Technological Installation. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. 2022. P. 1–6. DOI:[10.1109/MEES58014.2022.10005724](https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005724)

### References

1. Anishchenko, A., Kukhar, V., Artiukh, V. and Arkhipova, O. (2018). Application of G. Lamé's and J. Gielis' formulas for description of shells superplastic forming. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 239. 06007. DOI:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201823906007> [in English].

2. Surianinov, M., Shyliaiev, O. (2018). Calculation of plate-beam systems by method of boundary elements. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. Vol. 7(2). P. 238–241. DOI:[10.14419/ijet.v7i2.23.11927](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11927) [in English].

3. Fomin, V, Bekirova, M., Surianinov, M., Fomina, I. (2019). Nonlinear dynamic analysis of a reinforced concrete frame by the boundary element method. *Materials Science Forum*, 968 MSF. P. 383-395. DOI:[10.4028/www.scientific.net/MSF.968.383](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.383) [in English].

4. Karnaukh, S.G., Markov, O.E., Aliieva, L.I. and Kukhar, V.V. (2020). Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 109(9–12). P. 2457–2464. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7> [in English].

5. Kukhar, V., Balalayeva, E., Hurkovska, S., Sahirov, Y., Markov, O., Prysiashnyi, A., and Anishchenko, O. (2019). The Selection of Options for Closed-Die Forging of Complex Parts Using Computer Simulation by the Criteria of Material Savings and Minimum Forging Force. *Advances in Intelligent Systems and Computing, Singapore: Springer*. P. 325–331. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8618-3\\_35](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8618-3_35). [in English].

6. Shapoval, A. and Shapoval, A. (2002). Development of the unit for multi -stage vibration drawing of metal products. *Tsvetnye Metally*. Vol. 4. P. 77–82. [in English].



7. Hrudkina, N.S., Markov, O.E., Shapova, I.A., Titov, V.A., Aliiev, I.S., Abhari, P., Malii, K.V. (2022). Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion *FME Transactions*. Vol. 50(1). P. 90–98. DOI:[10.5937/fme2201090H](https://doi.org/10.5937/fme2201090H) [in English].

8. Shapoval O., Vakulenko R., Kulynych V., & Savchenko I. (2024). Tube sheet ligament thickness selection and stress analysis during tube expansion. *Key Engineering Materials*, 1004, 85–91. <https://doi.org/10.4028/p-h2X9dl> [in English].

9. Pavlenko, D.V., Belokon', Y.O., Tkach, D.V. (2020). Resource-Saving technology of manufacturing of semifinished products from intermetallic  $\gamma$ -TiAl alloys intended for aviation engineering. *Materials Science*. Vol. 55(6). P. 908–914. DOI:[10.1007/s11003-020-00386-1](https://doi.org/10.1007/s11003-020-00386-1) [in English].

10. Markov, O., Khvashchynskiy, A., Musorin A., Markova M., Shapoval A. and Hrudkina N. (2022). Investigation of new method of large ingots forging based on upsetting of workpieces with ledges, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 122(3–4). P. 1383–1394. DOI:[10.1007/s00170-022-09989-1](https://doi.org/10.1007/s00170-022-09989-1) [in English].

11. Sikulskiy, V., Kashcheyeva, V., Romanenkov, Y., Shapoval, A. (2017). Study of the process of shapeformation of ribbed doublecurvature panels by local deforming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4(1). P. 43–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108190> [in English].

12. Kukhar V, Kostryzhev A, Dykha O, Makovkin O, Kuziev I, Vakulenko R, Kulynych V, Malii K, Butenko E, Hrudkina N, et al. Technological and Chemical Drivers of Zinc Coating Degradation in DX51d+Z140 Cold-Formed Steel Sections. *Metals*. 2026; 16(2):146. <https://doi.org/10.3390/met16020146> [in English].

13. Kukhar, V., Vasylevskiy, O., Khliestova, O., Berestovoi, I. and Balalayeva, E. (2021). Hydraulic Press Open Die Forging of 21CrMoV5-7 Steel CCM Roller with Flat Upper and Concave Semiround Lower Cogging Dies. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. P. 489–498. DOI:[10.1007/978-3-030-91327-4\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_48) [in English].

14. Kruzhilko, O., Volodchenkova, N., Maystrenko, V., Bolibrukh, B., Kalinchyk, V.P., Zakora, A., Feshchenko, A. and Yeremenko, S. (2021). Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprise. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 1(108). P. 35–41. DOI:[10.5604/01.3001.0015.4797](https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.4797) [in English].

15. Sereda, B., Zherebtsov, A., Belokon', Y. (2010). The modeling and processes research of titan aluminides structurization received by SHS

technology. *TMS Annual Meeting*. P. 99–105. [in English].

16. Sereda, B., Sereda, D., Belokon, Y. (2015). Investigation of corrosion and oxidation of  $\gamma$ -TiAl alloys obtained in self propagating high temperature synthesis. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. 2015. Vol. 2. P. 1249–1255. [in English].

17. Khrebtova, O., Shapoval, O., Markov, O., Kukhar, V., Hrudkina, N. and Rudych, M. (2022). Control Systems for the Temperature Field During Drawing, Taking into Account the Dynamic Modes of the Technological Installation. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. P. 1–6. DOI:[10.1109/MEES58014.2022.10005724](https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005724) [in English].

### CALCULATION AND MANUFACTURING OF TOOLING FOR IMPULSE TUBE EXPANSION BY SOLID BODY IMPACT

*In the article, when studying the expansion of a local section of a pipe, the following assumptions were adopted: a plane strain state of deformation; maximum deformations are tangential and are determined by the ratio of the diameters before and after deformation; deformation of the tube sheet in a local area occurs as the indentation of a linear punch into a half-space.*

*Ballistic and strength calculations of the technological equipment were carried out during the design stage. In the experimental phase, a PC-84 powder-actuated mounting pistol, commonly used in construction for making holes in reinforced concrete beams and for fastening operations with dowels, was used for tube expansion.*

*The main focus was on the development of the tooling design. A punch design was proposed both in the form of a split collet and in the form of separate segments, with preference given to the latter. It was established that a large number of slots in the collet is undesirable, as it leads to increased faceting and, consequently, a reduction in joint quality. Strength calculations of the collet petals showed that with a small number of slots, high bending stresses occur at their roots, which significantly reduces the stability of the collet.*

*A structural scheme of the expansion tooling is presented. Working documentation was prepared, and tooling for fastening pipes was manufactured and subsequently used in developing the technology for joining pipes to tube sheets. Experimental studies were carried out on fragments of tube sheets.*

*An analysis of energy capabilities was performed. It was experimentally determined that by varying the charge magnitude, processing can be performed using the PC-84 mounting pistol. Relative values of faceting for different design*



configurations of punch segments and joint parameters are presented. It was found that increasing the number of segments significantly improves the stability of the tooling set.

Machining of the segment surfaces was carried out in assembly with a mandrel in the working position (in the gap formed along the

diametral planes of the segments, plates of appropriate thickness were installed to ensure high-quality machining).

**Keywords:** number of slots, strength calculations, pipe joints, linear punch, assembly gun.

#### Відомості про автора

**Вакуленко Роман Андрійович** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Україна, 39600, e-mail: [rom.vak311@gmail.com](mailto:rom.vak311@gmail.com)). <https://orcid.org/0000-0002-8845-962X>

**Саленко Юлія Сергіївна** - доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Україна, 39600, e-mail: [salenko.yulia.75@gmail.com](mailto:salenko.yulia.75@gmail.com)). <https://orcid.org/0000-0002-5458-0990>

**Ікальчик Микола Іванович** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії та транспортних технологій, Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Ніжинський агротехнічний інститут» (вул. Шевченка, 10, м. Ніжин, Чернігівська обл., Україна, 16600, e-mail: [m.ikalchik@gmail.com](mailto:m.ikalchik@gmail.com)). [http:// orcid.org/ 0000-0001-7085-2952](http://orcid.org/0000-0001-7085-2952)

**Vakulenko Roman** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of industrial Engineering Mikhaïlo Ostrohradskyi Kremenchuk National University (St. University , 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600, e-mail: [rom.vak311@gmail.com](mailto:rom.vak311@gmail.com)). <https://orcid.org/0000-0002-8845-962X>

**Salenko Yulia** –, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of industrial Engineering Mikhaïlo Ostrohradskyi Kremenchuk National University (St. University , 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600, e-mail: [salenko.yulia.75@gmail.com](mailto:salenko.yulia.75@gmail.com)) <https://orcid.org/0000-0002-5458-0990>

**Ikalchik Mykola** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of agroengineering and transport technologies Separated subdivision of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute" (Shevchenko str., 10, Nizhyn, Chernihiv region., Ukraine, 16600, e-mail: [m.ikalchik@gmail.com](mailto:m.ikalchik@gmail.com)). [http:// orcid.org/ 0000-0001-7085-2952](http://orcid.org/0000-0001-7085-2952)

Стаття надійшла 01.05.2026

Стаття прийнята 15.05.2026

Опубліковано 28.05.2026