

**Вакуленко Р. А.**

к.т.н., доцент

**Кременчуцький  
національний  
університет імені  
Михайла  
Остроградського****Vakulenko R.**

Ph.D., Associate Professor

**Mikhailo Ostrohradskyi  
Kremenchuk National  
University****УДК 539.3:621.643****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-5****РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПОВЕДІНКИ  
НЕЖОРСТКИХ СКЛАДНОЇ  
КОНФІГУРАЦІЇ МІЖТРУБНИХ  
ПЕРЕМИЧОК ТРУБНОЇ ДОШКИ  
ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ  
НАВАНТАЖЕННІ**

У статті розглянуто просту двовимірну осесиметричну механічну модель технологічної системи операції роздачі сталевий труби у сталеву трубну решітку. Трубні решітки замінюються еквівалентною втулкою, що має висоту  $H$  і радіуси внутрішньої і зовнішньої поверхонь  $R_1$  і  $R_2$  відповідно. Був виконаний розрахунок для пари металів, що найбільш застосовується. Сталева труба та трубна решітка деформується за пружнопластичним типом. Матеріал труби сталь типу 12X18H9T. Матеріал трубної дошки сталь типу 40X. Зсередини труба відчуває дію імпульсного тиску, неоднорідного за довжиною та в часі. Наведена амплітуда тиску під час імпульсного розвальцювання та зварювання вибухом труб з трубними решітками. Для вирішення за методом Вілкінса труба була розбита на чотирикутні елементи. У радіальному напрямку використано 6 рядів елементів, в осьовому напрямку 400 рядів, всього для труби використано 2400 елементів. Втулка розбита в радіальному напрямку на 23 ряди та в осьовому напрямку на 100 рядів елементів, всього 2300 елементів. Надалі деформований стан аналізувався у ряді характерних точок, розташованих на зовнішній поверхні труби та внутрішній поверхні втулки. Представлені на графіку радіальні переміщення точок на поверхні труби у початковий період часу. Неодночасність зіткнень і несинфазність коливань свідчать про згинання та згинальні коливання труби. Також наведено залежність переміщень вузлів на внутрішній поверхні втулки у радіальному напрямку від часу деформування та залежність радіальної швидкості точок на зовнішній контактній поверхні труби від часу деформування. Представлено залежність швидкості переміщення точок вузлів, розташованих на поверхні втулки, від часу у початковому періоді процесу. Напружений стан елементів системи характеризується виникненням хвиль напруг, що утворюються при ударі труби та поширюються у втулці та трубі. Виконано аналіз процесу кріплення труби при використанні моделі плоского деформованого стану. Спільне деформування труби та трубної дошки з гексагональним розташуванням отворів розглянуто для випадку розвальцювання однієї труби у середині трубної решітки.

**Ключові слова:** труба та трубна решітка, імпульсне навантаження, умова, рівнянь руху, параметри розвальцювання.

**Постановка проблеми.** На стадіях проектування теплообмінних апаратів й технологічної підготовки виробництва дуже актуальним є питання вибору товщини перемички між отворами трубних дошок (ступеня перфорації). Визначальними чинниками при цьому є теплотехнічні розрахунки [1-4]. Проте важливе



значення має і можливість здійснення необхідного ступеня розвальцювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однією з найбільш трудомістких технологічних операцій у виробництві теплообмінної апаратури є операція із закріплення труб у трубних решітках. Заміна труб, що вийшли з ладу в процесі експлуатації, також пов'язана з технологічними труднощами. Тому пошук ефективних методів отримання таких з'єднань у виробництві та при ремонті теплообмінного обладнання є дуже важливим та актуальним завданням для нашої промисловості. Рішення її має як велику практичну цінність, а й представляє певний теоретичний інтерес. [1-4]

Вивчення механізму закріплення труби в трубних решітках при імпульсному навантаженні дає можливість правильно визначити параметри технологічного процесу і вести його на оптимальних режимах.

Застосовуваний в даний час в машинобудівній практиці спосіб механічного розвальцювання труб за допомогою роликів кріпильних вальців є недостатньо продуктивним і не забезпечує стабільної якості з'єднань. [1-4]

Останнім часом запропоновані та інтенсивно розробляються такі способи, засновані на використанні імпульсних навантажень: запресування труб за схемою електрогідравлічного ефекту, використання вибуху бризантних вибухових речовин, магніто-імпульсний спосіб, а також спосіб закріплення труб ударним імпульсом жорсткого інструменту.

**Мета і завдання досліджень.** У практиці освоєння технології розвальцювання вибухом необхідно забезпечити мінімально можливі деформації перемички між отворами, щоб залишкова деформація перемички  $|e_{ir}|_{ост}$  була меншою за допустиму  $\varepsilon_{i док}$ . Вона може трансформуватися без кінцевих деформацій перемички, тобто на вільній поверхні сусіднього отвору є тільки пружні деформації, хоча навколо труби, що розвальцюється, – пластичні.

**Матеріали і методи досліджень.** Розглянемо просту двовимірну осесиметричну механічну модель технологічної системи операції

роздачі сталеві труби у сталеву трубну решітку (рис. 1). Трубні решітки замінюються еквівалентною втулкою [5-9], що має висоту  $H$  і радіуси внутрішньої і зовнішньої поверхонь  $R_1$  і  $R_2$  відповідно. Еквівалентна втулка – це товстостінна труба, яка за своєю жорсткістю відповідає ділянці трубної решітки, що оточує отвір трубної решітки.

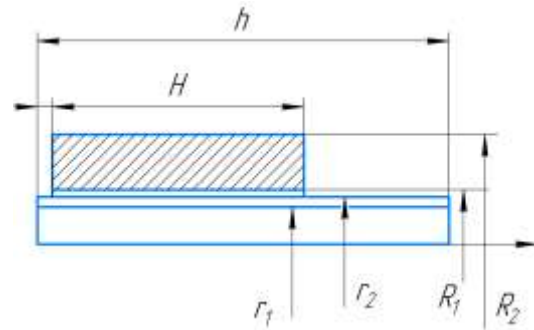


Рис. 1. Модель з'єднання труби з еквівалентною втулкою

У моделі розглядається частина труби довжиною  $h$ , що має радіуси внутрішньої та зовнішньої поверхонь  $r_1$  і  $r_2$  відповідно. Між трубою та втулкою залишено технологічний зазор величиною  $R_1 - r_2$ . Труба має технологічний виступ за торець втулки завбільшки  $h_1$ . Був виконаний розрахунок для пари металів, що найбільш застосовується, з геометричними розмірами елементів системи:  $r_1 = 0,011$  м,  $r_2 = 0,0125$  м,  $h = 0,1$  м,  $h_1 = 0,002$  м,  $R_1 = 0,0135$  м,  $R_2 = 0,025$  м,  $H = 0,05$  м,

Технологічний зазор між трубою та трубною решіткою дорівнює 1 мм. Вважаємо, що сталеві труба та трубна решітка деформується за пружнопластичним типом. Характеристики міцності труби і дошки наведені в таблицях 1 і 2. Матеріал труби (сталь типу 12X18H9T) характеризується значеннями параметрів

Таблиця 1

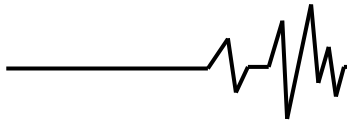
Залежність напруги труби від деформацій

$\varepsilon$	0,0	0,001	0,00125	0,0015	0,002	0,003	0,004	0,005
$\sigma \times 10^{-8}$ Па	0	1,88	2,21	2,38	2,51	2,67	2,84	2,95

$$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad \nu = 0,3,$$

$$E = 1,88 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \quad \sigma_T = 1,88 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

Матеріал трубної дошки (сталь типу 40X), що характеризується значеннями параметрів



$$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \nu = 0,3,$$

$$E = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \sigma_T = 4,0 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

Таблиця 2

Залежність напруги трубної решітки від деформацій

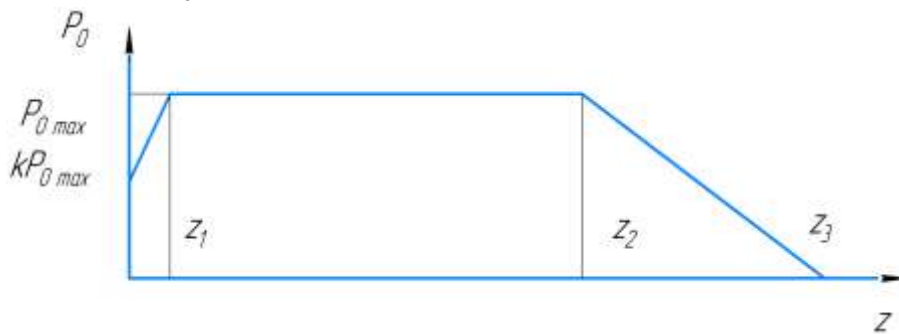
$\varepsilon$	0,0	0,002	0,0025	0,003	0,004	0,006	0,008	0,01
$\sigma \times 10^{-8} \text{ Па}$	0	4,0	4,34	4,44	4,6	4,88	5,12	5,3

Зсередини труба відчуває дію імпульсного тиску, неоднорідного за довжиною та в часі [10-13]:

$$P(t) = P_0 e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (1)$$

де  $\theta$  – характеристичний час, с;  $P_0$  – амплітуда тиску, що залежить від осьової координати.

В осьовому напрямку амплітуда тиску має вигляд, представлений на рис. 2



$z_1, z_2, z_3$  – параметри навантажень

Рис. 2. Амплітуда тиску під час імпульсного розвальцювання та зварювання вибухом труб з трубними решітками

Крива, що визначає амплітудні значення тиску по осі, описується значеннями коефіцієнтів даного з'єднання:

Па, , м, м, .

На правій межі труби встановлено умови жорсткого заземлення. Внутрішня поверхня втулки та зовнішня поверхня труби можуть вступати у контактну взаємодію. Інші межі вільні.

Для вирішення за методом Вілкінса [14-17] труба була розбита на чотирикутні елементи. У радіальному напрямку використано 6 рядів елементів, в осьовому напрямку 400 рядів, всього

для труби використано 2400 елементів. Втулка розбита в радіальному напрямку на 23 ряди та в осьовому напрямку на 100 рядів елементів, всього 2300 елементів. Початковий розмір осесиметричного квадратного елемента труби становить 0,25×0,25 мм, втулки – 0,5×0,5 мм. Повна кількість елементів моделі дорівнює 4700.

Процес деформування елементів системи досліджується протягом 0,0001с. Положення сіток у вихідному недеформованому стані (а) та в момент 0,0001с після початку деформування (б) представлено на рис. 3

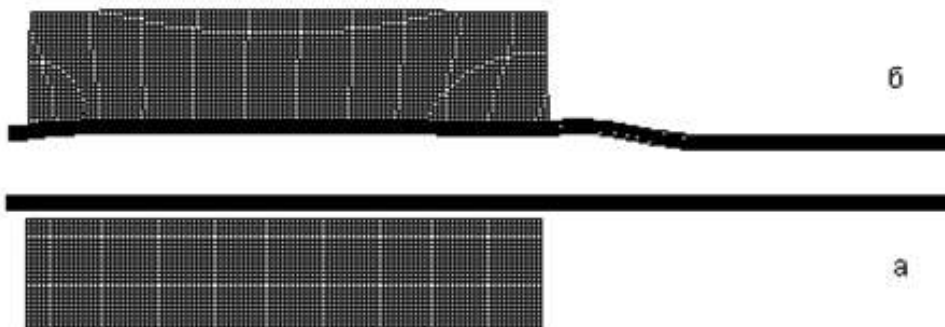
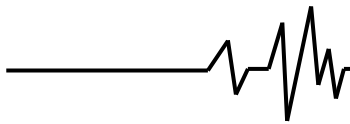


Рис. 3. Звичайно-різницева сітка системи труба – еквівалентна втулка: а – у вихідному стані, б – у момент 0,0001 секунд від початку деформування



Слід зазначити локальність деформування труби, у зв'язку з чим штучна межа труби може бути наближена до правої межі втулки на відстань 15 мм без погіршення точності розрахунку. Очевидна сильна осьова неоднорідність поля переміщень поблизу торців втулки, тоді як у середній частині, віддаленої приблизно 15 мм від торців, поле переміщень досить однорідно в осьовому напрямі. Праворуч від торця втулки

спостерігається витріщення вільної частини труби.

Надалі деформований стан аналізується у ряді характерних точок, розташованих на зовнішній поверхні труби та внутрішній поверхні втулки (рис. 4). Усі зазначені точки є розрахунковими вузлами сітки.

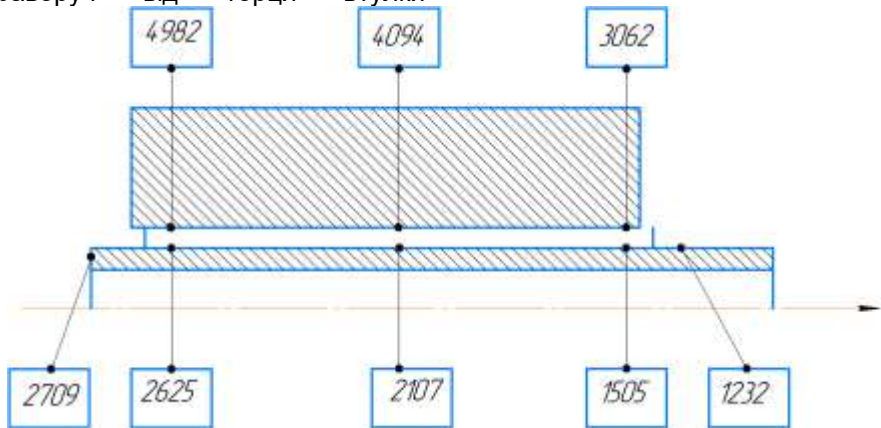


Рис. 4. Розрахункові вузли сітки труби та трубних решіток динамічної моделі з'єднання труб із трубними решітками

Вузли 3062, 4094, 4982 належать втулці. Перший та третій вузли розташовані на відстані 5 мм від торців, а другий лежить у середині поверхні. Вузли 1505, 2107, 2625 лежать на поверхні труби навпроти вузлів 3062, 4094, 4982. Вузол 2709 лежить на поверхні труби в районі торця втулки, а вузол 1232 лежить на

вільній поверхні труби на 5 мм правіше торця втулки.

Радіальні переміщення точок 1232, 1505, 2107, 2625 та 2709 на поверхні труби як функції часу у початковий період часу представлені на рис. 5.

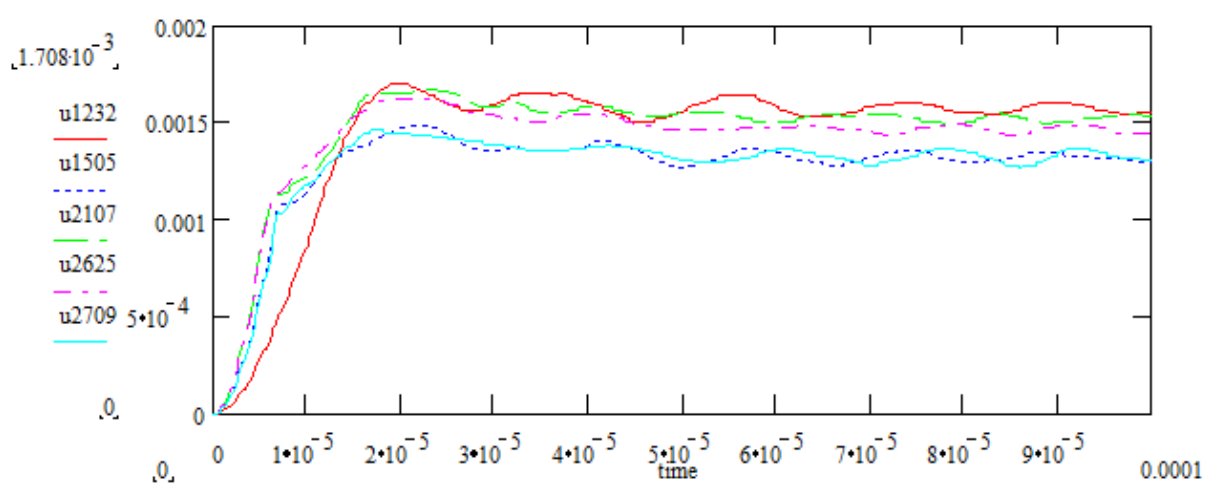


Рис. 5. Радіальні переміщення точок на поверхні труби у початковий період часу

To construct a rounded diagram, write down the Як видно, всі вузли (за винятком 1232) при зіткненні з втулкою змінюють характер зміни переміщень, про що свідчить злам на графіках. Матеріал втулки пластично деформується, спостерігається спільний рух втулки та труби, внаслідок чого межа розділу займає нове положення з великим значенням радіусу. При

попередніх розрахунках із суто пружною втулкою характер графіків при зіткненні був іншим, спостерігався відскок.

Як видно з рис. 5 точки 1505, 2107, 2625 та 2709 стикаються з поверхнею втулки у різні моменти часу, що свідчить про неоднорідність контактної взаємодії труби та втулки у часі. Після першого зіткнення зазначені точки



поводяться подібним чином, коливання з періодом  $1,5 \times 10^{-5}$  с і повторні зіткнення з втулкою. Несинфазність коливань свідчать про згинання та згинальні коливання труби. Неодночасність зіткнень і

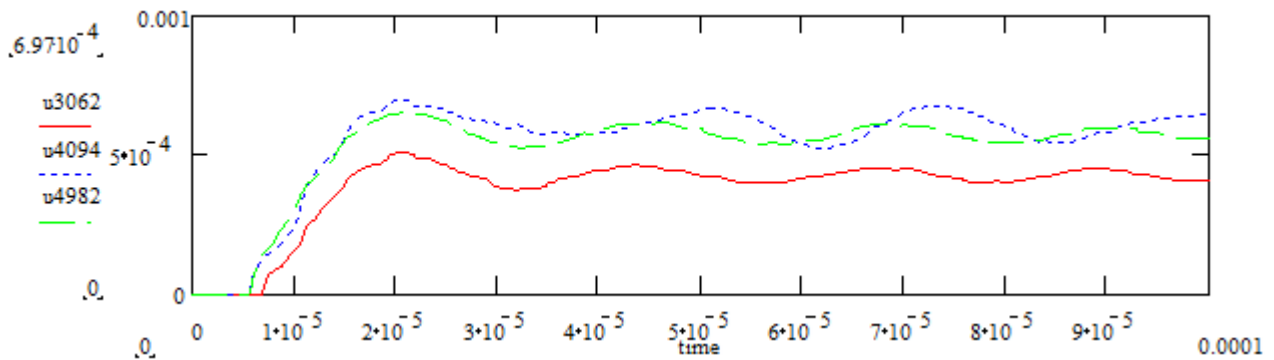


Рис. 6. Залежність переміщень вузлів на внутрішній поверхні втулки у радіальному напрямку від часу деформування

На рис. 6 показана залежність переміщень вузлів 3062, 4094, 4982, розташованої на внутрішній контактній поверхні втулки, у радіальному напрямку залежно від часу. До моменту, приблизно рівного  $0,7 \times 10^{-5}$  з відповідного моменту зіткнення труби і втулки, стінка спочиває, і переміщення відсутні. При ударі стінка набуває імпульсу і починає рухатися, максимальні переміщення досягають величини  $(5-7) \times 10^{-4}$  м. Коливання крайніх точок 3062 та 4982 синфазні, але мають різну амплітуду. Коливання центральної точки 4094 відбувається зі зміщенням фази по відношенню до коливань крайніх точок, що свідчить про наявність згинальних коливань на поверхні

втулки. Періоди коливань зазначених трьох точок однакові і дорівнюють  $2,5 \times 10^{-5}$  с.

Коливання точок поверхні втулки і труби відбуваються, як раніше зазначено, з різними частотами, що з одного боку відображає різну жорсткість цих елементів, а з іншого боку зумовлює безперервні протягом  $0,00001$  с зіткнення і коливання поверхонь і, отже, самих елементів. У зв'язку з таким характером поведінки елементів доречно порушити питання про методику прогнозу величини натягу за результатами розрахунку і розробку механізму заспокоєння поверхневих коливань елементів.

Залежність радіальної швидкості точок на зовнішній контактній поверхні труби іноді показано на рис. 7.

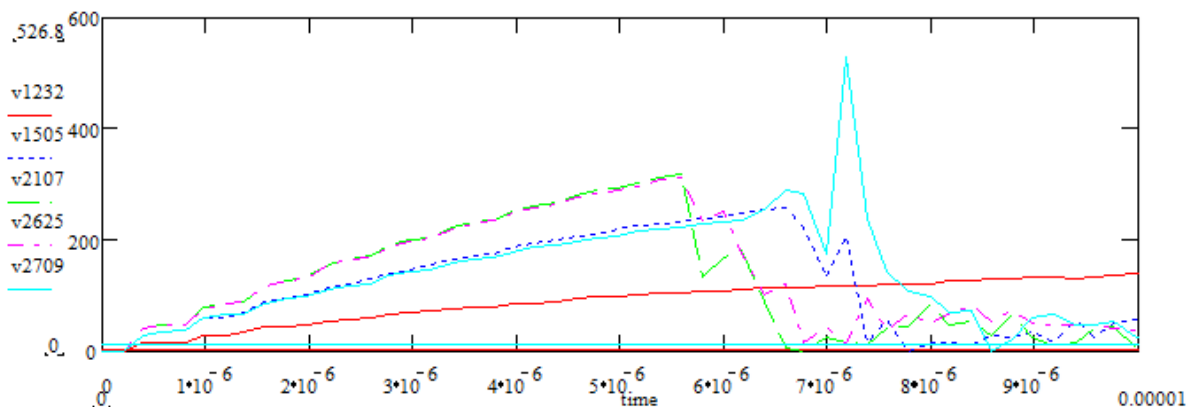


Рис. 7. Залежність радіальної швидкості точок на зовнішній контактній поверхні труби від часу деформування

Різні точки по-різному набирають швидкість. Швидкості вузлів 2107 і 2625 на етапі вільної роздачі досягають максимальних значень приблизно  $320$  м/с в момент часу  $5,5 \times 10^{-6}$  с, а швидкість вузла 1505 – всього близько  $260$  м/с у пізніший момент  $6,6 \times 10^{-6}$  с.

Після першого зіткнення швидкість різко падає і надалі не перевищує  $25...30$  м/с, що пов'язано з перетворенням кінетичної енергії труби на роботу деформування елементів системи, а також накопичення та дисипації енергії в різних формах.



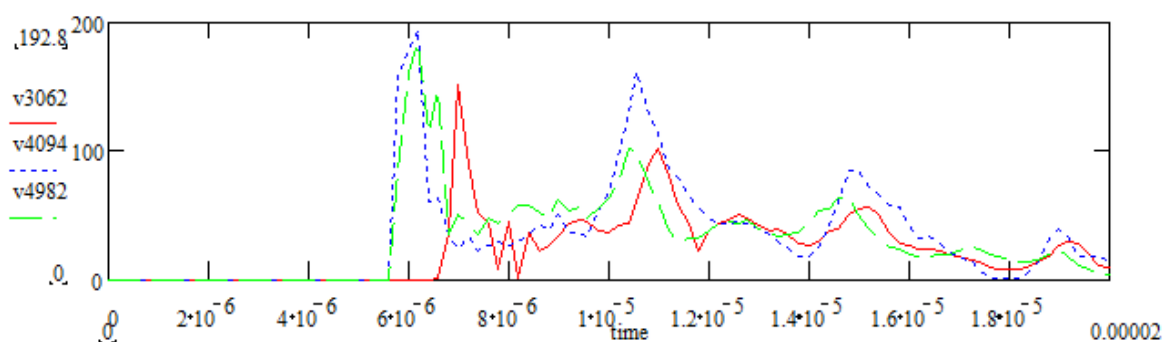


Рис. 8. Залежність швидкості переміщення точок вузлів, розташованих на поверхні втулки, від часу у початковому періоді процесу

На рис. 8 представлені залежності швидкостей вузлів, розташованих на поверхні втулки, від часу початковому періоді процесу. До першого зіткнення точки спочивають, потім внаслідок зіткнення швидкості зростають, досягаючи величини 200 м/с, а надалі також падають, причому їх максимальні значення не перевищують рівня 20 м/с.

**Висновки.** Напружений стан елементів системи характеризується виникненням хвиль напруг, що утворюються при ударі труби та поширюються у втулці та трубі. У зв'язку з неодноразовним зіткненням хвилі напруг мають нециліндричну форму.

У момент часу 0,0001 с на внутрішній поверхні втулки, радіальні напруги мають у середній частині поверхні негативне значення, а по краях (від правого торця до вузла 3062 та від лівого торця на 20 мм у середину) – позитивне. Іншими словами, в середній частині (приблизно 25 мм) спостерігається стиснення, тоді як по краях спостерігається розкриття з'єднання елементів. Втім, до цього моменту коливання ще не припинилися, і робити висновок про величину натягу передчасно.

Тим не менш, ясно, що величина натягу очікується нерівномірною по довжині утворювальної втулки.

#### Список використаних джерел

1. Anishchenko A., Kukhar V., Artiukh V. and Arkhipova O. Application of G. Lamé's and J. Gielis' formulas for description of shells superplastic forming. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 239. 06007.
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 V.
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.

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.

5. Kukhar V., Balalayeva E., Hurkovska S., Sahirov Y., Markov O., Prysiaznyi 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.

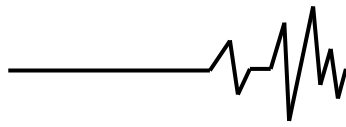
6. Shapoval A. and Shapoval A., Development of the unit for multi -stage vibration drawing of metal products. *Tsvetnye Metally*. 2002. Vol. 4. P. 77–82.

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.

8. Neutov S., Sydoruk M., Surianinov M. Experimental studies of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete beams with short-term and long-term loads. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968 MSF. P. 227–233.

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.

10. Markov O., Khvashchynskiy 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.



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.

12. Sereda B., Sheyko S., Belokon Y., Sereda D. The influence of modification on structure and properties of rapid steel. *AIST Steel Properties and Applications Conference Proceedings - Combined with MS and T'11, Materials Science and Technology*. 2011. P. 457–460.

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.

14. Kruzhilko 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.

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.

### References

1. Anishchenko, A., Kukhar, V., Artiukh, V. and Arkhipova, O. (2018). Application of G. Lame's and J. Gielis' formulas for description of shells superplastic forming. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 239. 06007. [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 V. [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. [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. [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. [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.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. [in English].

8. Neutov, S., Sydorhuk, M., Surianinov, M. (2019). Experimental studies of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete beams with short-term and long-term loads. *Materials Science Forum*. Vol. 968 MSF. P. 227–233. [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. [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. [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. [in English].

12. Sereda, B., Sheyko, S., Belokon, Y., Sereda, D. (2011). The influence of modification on structure and properties of rapid steel, *AIST Steel Properties and Applications Conference Proceedings - Combined with MS and T'11, Materials Science and Technology*. P. 457–460. [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. [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. [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. [in English].

#### **DEVELOPING THE BEHAVIORAL PATTERN OF NON-RIGID INTERPIPE JUMPERS WITH COMPLEX CONFIGURATION AT A PIPE BOARD UNDER IMPULSE LOADING**

*The article deals with the simple two-dimensional axis-symmetric mechanical model of the technological system of the operation to distribute a steel pipe into a steel pipe grid is considered. The pipe grids are replaced by an equivalent bushing having a height  $H$  and radii of the inner and outer surfaces  $R_1$  and  $R_2$ ,*

*respectively. The calculation was made for the most commonly used metal pair. The steel pipe and pipe grid are assumed to deform according to the elastoplastic type. The pipe material steel type 12X18H9T Material of the pipe board steel type 40X. From the inside, the pipe is subjected to impulsive pressure, being not uniform in length and time. The pressure amplitude during pulsed flaring and explosion welding of pipes with pipe grids is given. For solution under the Wilkins method, the pipe was divided into quadrilateral elements. In the radial direction 6 rows of elements were used, in the axial direction – 400 rows, and there totally were 2400 elements used for the pipe. The bushing is divided into 23 rows in the radial direction and 100 rows of elements in the axial direction, with totally 2300 elements. Further, the deformed state was analyzed at a number of characteristic points located on the pipe outer surface and the bushing inner surface. The graph shows the radial displacements of points on the pipe surface in the initial period of time. The non-simultaneity of the collisions and the out-of-phase oscillations indicate bending and bending vibrations of the pipe. The dependence of the node displacements on the bushing inner surface in the radial direction on the deformation time and the dependence of the point radial velocity on the outer contact surface of the pipe on the deformation time are also shown. The dependence of the displacement speed of the points of the nodes located on the sleeve surface on time in the initial period of the process is given. The stressed condition of the system elements is characterized by the occurrence of stress waves generated by pipe being struck and spreading in the bushing and pipe. The process of pipe fastening is analyzed using the model of a flat deformed state. The co-deformation of a pipe and a pipe board with a hexagonal hole arrangement is considered for the case if a single pipe needs flaring inside the pipe grid.*

**Keywords:** pipe, pipe grid, impulse loading, condition, equations of motion, flaring parameters.

#### **Відомості про автора**

**Вакуленко Роман Андрійович** - кандидат технічних наук, 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)).

**Vakulenko Roman** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of industrial Engineering Mikhalilo Ostrohradskyi Kremenchuk National University (St. University , 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600, e-mail: [rom.vak311@gmail.com](mailto:rom.vak311@gmail.com)).