

УДК 539.3

**В.О. МЕТЕЛЬОВ****ПРУЖНОПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ТРУБЧАТИХ ЗАГОТІВОК**

Розглянуто задачу профілювання труб з урахуванням виникнення незворотних пластичних деформацій. В роботі запропоновано застосування програмних комплексів, заснованих на методі скінченних елементів (МСЕ), які здатні з високою точністю відтворювати реальний технологічний процес. Розглянуто основні співвідношення методу розрахунку. Для наданої схеми холодного профілювання труб створено розрахункову модель. Виконано розрахунки напружено-деформованого стану труб, що профілюються, при послідовному проходженні через кліть прокатного стану.

**Ключові слова:** пластичність, МСЕ, модифікований лагранжевий підхід, напружено-деформований стан, трубчата заготівка, прокатний стан, профілювання труб.

**Вступ.** Багатопрогонові балки коробчастого поперечного перерізу, – так звані «профільні труби» є одним з конструктивних елементів сучасного машинобудування, тому вибір розрахункових схем для визначення їхнього напружено-деформованого стану є актуальною практичною задачею. Профільні труби мають дуже широкі сфери застосування: цивільне і промислове будівництво, різні металоконструкції, прольоти мостів, стелажів; у виробництві автомобілів, вагонів, каркасів, кранів, автобусів, сільгоспмашин, параболічних антен, конструкцій цивільного будівництва і т. д. У даній роботі розглядаються розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) коробчастих конструкцій [1-2].

Процес холодного профілювання характеризується великим рівнем напружень. Однією з найбільш навантажених є область у прямокутному перерізі, де при проходженні через кліть виникає значна концентрація напружень. Кліттю називають комплекс з приводних, нижнього і верхнього, та неприводних бокових роликів.

У даній роботі запропоновано застосування комп'ютерних комплексів, заснованих на МСЕ, що здатні з високою точністю відтворювати реальний технологічний процес холодного профілювання.

**Математичне формулювання задачі.** При моделюванні задачі протягу пружної заготівки прямокутного перерізу через недеформовані вальці використовувалася модифікований лагранжевий підхід [3].

До числа рівнянь, що лежать в основі лагранжевого підходу відносяться рівняння збереження маси, кількості руху і внутрішньої енергії, а також що рівняння стану, що замикає цю систему. Рівняння закону збереження маси:

$$\dot{\rho} + \rho \operatorname{div}(V) = 0, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність;  $V$  – швидкість.

Рівняння закону збереження кількості руху:

$$\rho \ddot{x} = \rho g + \operatorname{div}(\sigma), \quad (2)$$

де  $\ddot{x}$  – прискорення;  $\sigma$  – тензор напружень Коши;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Рівняння закону збереження енергії:

$$\rho \dot{u} = \sigma : D + \rho r - \nabla \cdot q, \quad (3)$$

де  $\dot{u}$  – швидкість зміни внутрішньої енергії;  $D$  – тензор швидкості деформації;  $r$  – інтенсивність об'ємного теплового джерела;  $q$  – тепловий потік;  $\nabla$  – оператор

Гамільтона; « $\cdot$ » – скалярний добуток; « $\cdot\cdot$ » – подвійний скалярний добуток.

У основі використовуваної просторової дискретизації лежить метод скінченних елементів (МСЕ), в основі тимчасової дискретизації – центральна диференціальна схема інтегрування другого порядку точності.

Просторова дискретизація рівняння збереження кількості руху припускає перехід від рішення диференціального рівняння (2) до рішення рівняння:

$$\int_V (\rho \ddot{x} - \rho g - \operatorname{div}(\sigma)) \cdot \Phi dv = 0, \quad (4)$$

з відповідними граничними умовами. З використанням відомих процедур МСЕ рішення рівняння (4) зводиться до рішення диференціального рівняння:

$$M \ddot{d} = F_i + F_e, \quad (5)$$

де  $\ddot{d}$  – вектор вузлових прискорень;  $M$  – матриця мас;  $F_i, F_e$  – вектори внутрішніх і зовнішніх сил.

Просторова дискретизація рівняння збереження енергії припускає перехід від рішення диференціального рівняння (3) до рішення рівняння:

$$\int_V (\rho \dot{u} - \sigma : D - \rho r + \nabla \cdot q) \cdot \varphi dv = 0. \quad (6)$$

З використанням відомих процедур МСЕ [4] рішення рівняння (6) зводиться до рішення диференціального рівняння:

$$M^\theta \dot{\theta} = F_i^\theta + F_e^\theta, \quad (7)$$

де  $\theta$  – температура;  $M^\theta$  – матриця теплоємкостей;  $F_i^\theta, F_e^\theta$  – вектори внутрішніх і зовнішніх теплових навантажень.

Вектор внутрішніх сил, який входить в рівняння (5), визначається третім членом підінтегрального виразу (4):

$$\int_V \operatorname{div}(\sigma) \cdot \Phi dv = \int_B (\sigma n) \cdot \Phi db - \int_V \sigma : (\nabla \Phi) dv, \quad (8)$$

і він дорівнює

$$F_i = \int_V \sigma : (\nabla \Phi) dv. \quad (9)$$

Вектор  $F_i$  знаходиться в результаті підсумовування внутрішніх сил для усіх елементів, що входять в дану систему. Для одного елемента вектор внутрішніх сил визначається наступним виразом:

$$f_i^e = \int_{V^e} B^T \bar{\sigma} dv, \quad (10)$$

де  $B$  – похідна від функцій форми елемента;  $\bar{\sigma}$  – вектор, складений з шести компонентів тензора напружень.

Вектор зовнішніх сил  $F_e$  який входить в диференціальне рівняння (5), враховує розподілені по поверхні тіла навантаження, об'ємні сили, такі як сили тяжіння, контактні сили, реакції зв'язків і інші сили.

Вузлові прискорення можуть бути визначені з рівняння (5) і записані таким чином:

$$\ddot{d} = M^{-1}(F_i + F_e). \quad (11)$$

Використання центральної диференціальної схеми інтегрування за часом другого порядку точності дозволяє визначити значення прискорень, швидкостей і переміщень:

$$\begin{aligned} \ddot{d}_n &= M^{-1}(F_i + F_e); \\ \dot{d}_n &= \dot{d}_{n-\frac{1}{2}} + \ddot{d}_n \Delta t; \\ d_{n+1} &= d_n + \dot{d}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t; \end{aligned} \quad (12)$$

де індекси відносять шукані величини до відповідних часових слоїв.

Для обчислення значення  $\omega_{\min}$  з використовується наступна оцінка [3]:

$$\omega_{\max} \approx \frac{2c}{\Delta x_{\min}}, \quad (13)$$

де  $c$  – швидкість звуку в матеріалі;  $\Delta x_{\min}$  – мінімальний характерний розмір елементів, що входять в дану систему.

Швидкість деформації визначається виразом:

$$\Delta \varepsilon = D \Delta t, \quad (14)$$

де  $D$  – тензор швидкості деформації, компоненти якого визначаються по залежності

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{dv_i}{dx_j} + \frac{dv_j}{dx_i} \right). \quad (15)$$

Для обліку обертання середовища як абсолютного жорсткого тіла при обчисленні тензора напруження Коши використовується коротаційна похідна Яумана:

$$\dot{\sigma} = L : D + \sigma W - W \sigma, \quad (16)$$

де  $W$  – тензор-спін, компоненти якого рівні:

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{dv_i}{dx_j} - \frac{dv_j}{dx_i} \right). \quad (17)$$

Петля інтегрування за часом диференціальних рівнянь включає наступні операції:

- обчислення вузлових навантажень;
- обчислення вузлових прискорень;
- обчислення вузлових швидкостей;
- обчислення приростів переміщень і переміщень;
- обчислення деформацій в елементах;
- обчислення напружень в елементах.

**Прокат пружної заготовки кільцевого перерізу через кліті.** У сучасній промисловості є поширеними технологічні процеси формування коробчастих конструкцій. Часто для цього використовуються прокатні стани [5-9]. Розглянемо одну з можливих розрахункових

схем, що включає п'ять клітей, що включають по чотири вальців (рис.1).

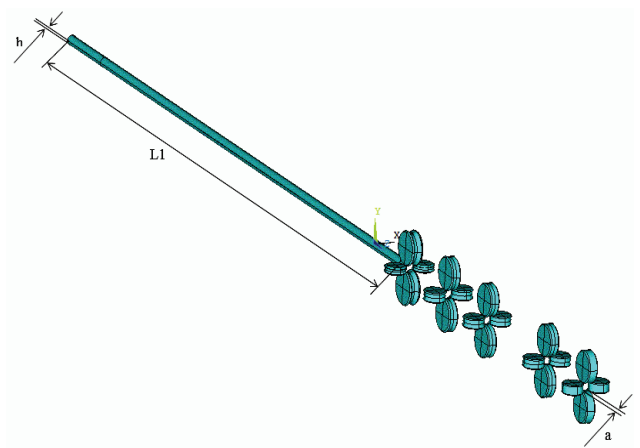


Рисунок 1 – Загальна схема розрахунку

Наведемо деякі початкові дані для розрахунку: матеріал – сталь конструкційна низьколегована для зварних конструкцій 17ГС;  $D = 0,1485$  м – діаметр заготовки;  $h = 0,006$  м – товщина заготовки;  $L_1 = 11,1$  м – довжина заготовки;  $a = 0,12$  м – відстань між роликками п'ятої кліті;  $V = 0,75$  м/с – швидкість заготовки;  $t = 12$  м – час;  $\sigma_T = 355$  МПа – межа текучості матеріалу труби;  $\sigma_B = 480$  МПа – границя міцності матеріалу труби.

Кліть складається з приводних нижнього і верхнього роликів та не приводних бокових роликів. У профільно-калібрувальному стані п'ять клітей, розташованих на деякій відстані одна від одної. Заготовка з постійною швидкістю  $V = 0,75$  м/с протягується через ролики.

Таким чином, якщо торець заготовки стикається з роликками, то у цей момент у вертикальному та горизонтальному напрямках починає діяти миттєво прикладене навантаження, яке переміщується із швидкістю руху заготовки від одного перерізу до іншого. Визначення напружено-деформованого стану в залежності від часу проведено за допомогою схем МСЕ та крокового інтегрування за часом.

Розрахунок напружено-деформованого стану проводився з урахуванням виникнення контактних напружень між заготовкою і роликками у пружно-пластичні постановці. Застосовано діаграму ідеально пластичного матеріалу з лінійним зміцненням.

Для розрахунку використовувався восьмивузловий трьохвимірний елемент (2110 СЕ вздовж  $L_1$  та 3 СЕ по  $h$ ). Загальна кількість 641476 СЕ, у тому числі 506399 СЕ на трубі.

Далі наводяться результати розрахунку для всіх клітей у момент часу  $t = 9,504$  с, тобто коли труба пройшла 7,128 м, а отже – вийшла з п'ятої кліті (рис. 2-5).

Отримані результати чисельних розрахунків напружено-деформованого стану, який виникає при протязі заготовки через ролики, дають можливість визначити картину розподілу прогинів і напружень СЕ моделі з урахуванням виникнення контактних напружень та пластичного деформування заготовки.

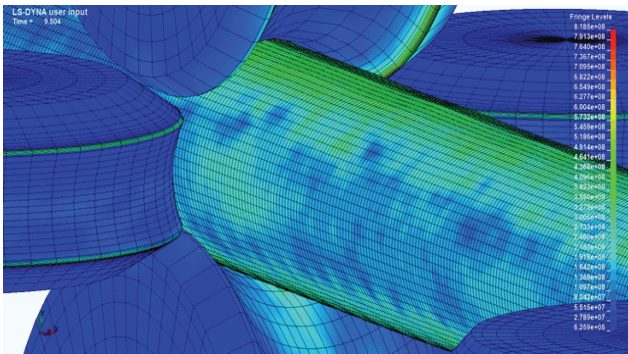


Рисунок 2 – Епюра загальних еквівалентних напружень заготовки за Мізесом у першій кліті

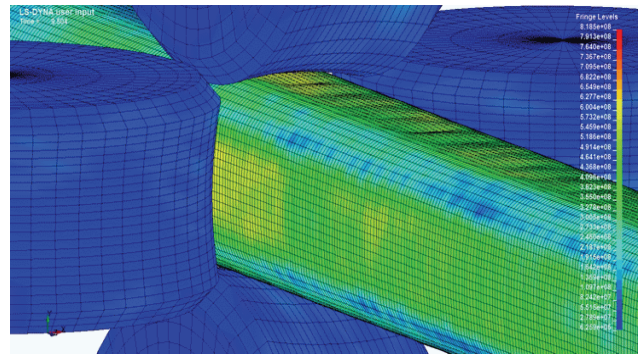


Рисунок 6 – Епюра загальних еквівалентних напружень заготовки за Мізесом у третій кліті

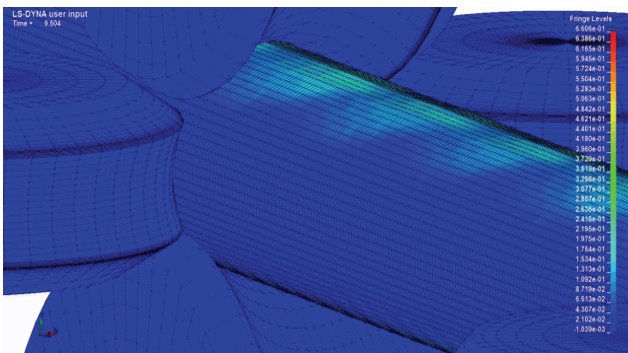


Рисунок 3 – Епюра пластичних деформацій заготовки у першій кліті

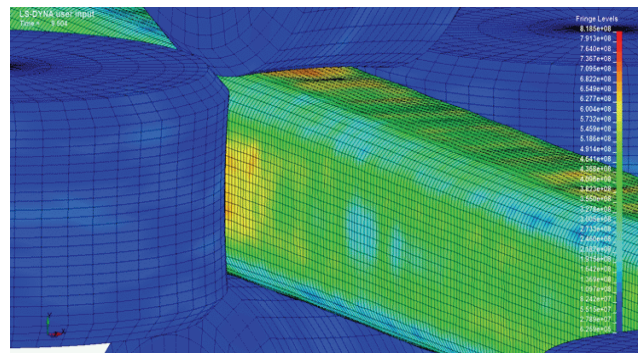


Рисунок 7 – Епюра загальних еквівалентних напружень заготовки за Мізесом у четвертій кліті

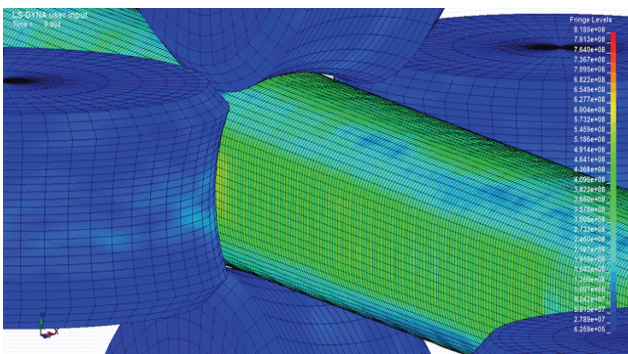


Рисунок 4 – Епюра загальних еквівалентних напружень заготовки за Мізесом у другій кліті

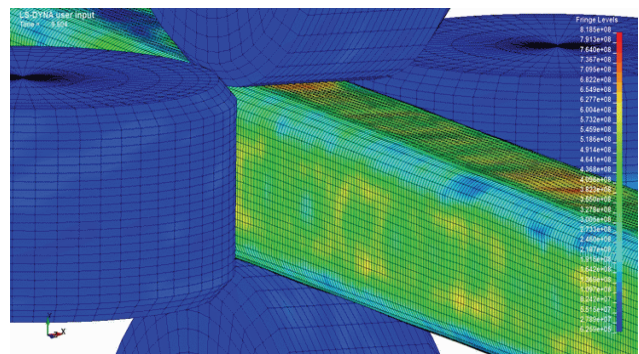


Рисунок 8 – Епюра загальних еквівалентних напружень заготовки за Мізесом у п'ятій кліті

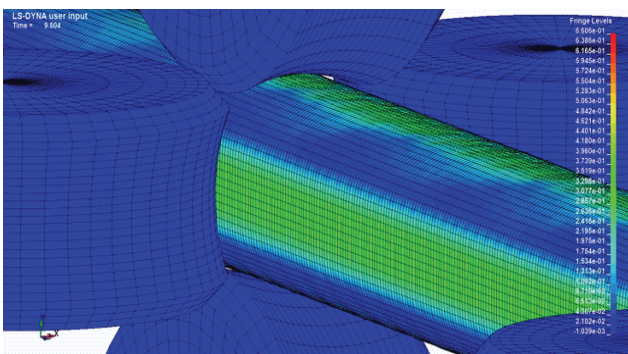


Рисунок 5 – Епюра пластичних деформацій заготовки у другій кліті

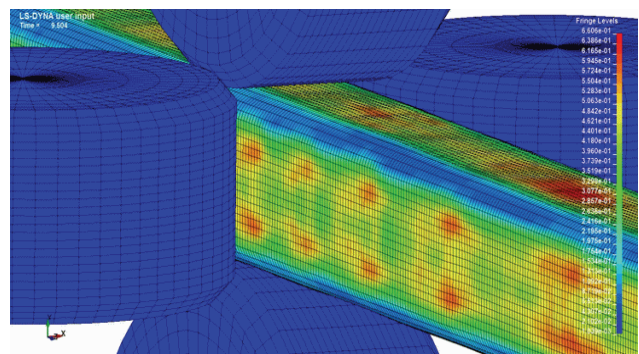


Рисунок 9 – Епюра пластичних деформацій заготовки у п'ятій кліті

Слід зазначити, що заготівка у момент часу  $t = 9,504$  с у першій та другій кліті вже має напруження, що не перевищують границю міцності, у третій, четвертій та п'ятій клітках напруження є вищими, ніж у перших двох. Якісно результати є подібними до реального процесу прокату заготівки, а чисельно характеристики напружено-деформованого стану труби можна розглядати після того, як труба пройде 6-8 м від розглянутої кліті, коли ефект від сумісності деформацій буде мінімальним.

**Висновки.** У даній роботі розглянуто задачі розрахунку деформування труб з урахуванням великих деформацій. Розглядалась задача прокату заготівки кільцевого перерізу через п'ять клітей. Проаналізувавши результати розрахунку, можна зробити висновок, що якісно результати схожі до реального технологічного процесу прокату заготівки, але, через те, що при розрахунку не були враховані деякі фактори, наприклад температура, та було недостатнє технічне забезпечення (накопичення помилок, через малий об'єм оперативної пам'яті), то розглядати отримані результати доцільно лише на першій та другій клітках.

Отримані результати свідчать про доцільність використання програмних комплексів скінченоелементного аналізу для дослідження процесу холодного профілювання труб.

**Список літератури:** 1. Метельов В.О. Розрахунки напружено-деформованого стану коробчастої конструкції / Д.В. Бреславський, В.О. Метельов // Матеріали X наук.-практ. конф. студ. та аспірант. інж.-фіз. ф-ту Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – С. 80-82. 2. Метелев В.А. Моделирование упруго-пластического деформирования тонкостенных конструкций / В.А. Метелев, И.В. Наумов // Сб. трудов XXV междунар. науч. конф.; в 10 т. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – Т. 3. – С. 74-76. 3. Муйземнек А.Ю. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с. 4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в тех-

нике: Пер. с англ. / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 238 с. 5. Шевакин Ю.Ф. Станы холодной прокатки труб / Ю.Ф. Шевакин, Ф.С. Сейдалиев. – М.: Металлургия, 1966. – 212 с. 6. Mei-rong Shuai Finite Element Simulation of Cold-Rolling Process of Shaped Steel Tube for Driving Shaft / Shuai Mei-rong, Liu Shao-bo, Gao Cong-min, Qin Jian-ping // International Journal of Iron and Steel Research. – 2010. - Vol. 17, № 8. - P. 25-29. 7. Calcagno B.O. Deformation and fracture of polymer/metal composites subjected to cold rolling / B.O. Calcagno, K.R. Hart, J.C. Springmann, G.G. Antoun, W.C. Crone // Composites Science and Technology. – 2012. - Vol. 72, № 12. - P. 1344-1351. 8. Mashayekhi M. Continuum damage mechanics analysis of strip tearing in a tandem cold rolling process / M. Mashayekhi, N. Torabian, M. Poursina // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2011. - Vol. 19, № 2. - P. 612-625. 9. Shen Y.F. Effects of cold rolling on microstructure and mechanical properties of Fe-30Mn-3Si-4Al-0.093C TWIP steel / Y.F. Shen, C.H. Qiu, L. Wang, X. Sun, X.M. Zhao, L. Zuo // Materials Science and Engineering: A. – 2013. - Vol. 561. - P. 329-337.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mietielov V. O., D. V. Breslavsky. Rozrachunki napruzhenno-deformovanogo stanu korobchastoyi konstrukciyi. Kharkiv: NTU "KhPI", 2011. Print. 2. Mietielov V. O., I. V. Naumov. Modelirovanie uprugoplasticheskogo deformirovaniya tonkostennykh konstrukcij. Kharkiv: NTU "KhPI", 2012. Vol. 3. Print. 3. Muzzemnek A. Ju., A. A. Bogach. Matematicheskoe modelirovanie processov udara i vzryva v programme LS-DYNA. Penza: Informacionno-izdatel'skij centr PGU, 2005. Print. 4. Zenkevich O. Metod konechnykh jelementov v tehnikе: Per. s angl. Moscow: Mir, 1975. Print. 5. Shevakin Ju. F., F. S. Sejdaliev. Stany holodnoj prokatki trub. Moscow: Metallurgija, 1966. Print. 6. Mei-rong, Shuai, et al. "Finite Element Simulation of Cold-Rolling Process of Shaped Steel Tube for Driving Shaft". International Journal of Iron and Steel Research 17.8 (2010): 25-29. Print. 7. Calcagno, B. O., et al. "Deformation and fracture of polymer/metal composites subjected to cold rolling". Composites Science and Technology 72.12 (2012): 1344-1351. Print. 8. Mashayekhi, M., Torabian N., Poursina M. "Continuum damage mechanics analysis of strip tearing in a tandem cold rolling process". Simulation Modelling Practice and Theory 19.2 (2011): 612-625. Print. 9. Shen, Y. F., et al. "Effects of cold rolling on microstructure and mechanical properties of Fe-30Mn-3Si-4Al-0.093C TWIP steel". Materials Science and Engineering: A 561 (2013): 329-337. Print.

Надійшла (received) 09.10.2015

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Метельов Володимир Олександрович** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-370-44-70; e-mail: vometel@gmail.com.

**Mietielov Volodymyr Oleksandrovych** – Postgraduate Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057)-370-44-70; e-mail: vometel@gmail.com.