

Prototypes Compared to Wrought Ti-6Al-4V, Mater Charact. 60, 2 (2009) 96–105  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.07.006>

17. K. Beyl, K. Mutombo, and C.P. Kloppers, Tensile properties and microstructural characterization of additive manufactured, investment cast and wrought Ti6Al4V alloy, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 012023 DOI:10.1088/1757-899X/655/1/012023

18. A.G. Lekatou, B.V. Efremenko, V. Haoui et al. Microstructure, electrochemical, wear and corrosive wear performance of laser-based powder bed fusion and wrought biomedical Ti–6Al–4V alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 35, 8 (2025) 2612-2631 [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(25\)66836-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(25)66836-1)

19. Eyal Eshed, Amnon Shirizly. Characterization of Nano-Sized Features in Powder Bed Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloy. Materials 18, 13 (2025) 3198  
<https://doi.org/10.3390/ma18133198>

**Величкович А. С., Витвицький В. С.**  
*(Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
м. Івано-Франківськ)*  
**ЧИСЛОВА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ЗВ'ЯЗАНОЇ СИСТЕМИ  
ЦИЛІНДРИЧНИХ ШТАМПІВ З ТОНКОСТІННОЮ ОБОЛОНКОЮ**  
E-mail: a\_velychkovych@ukr.net

Представлено числову модель локального підйому надземної ділянки магістрального газопроводу над опорною конструкцією для проведення ремонтних робіт. Підйом здійснюється мобільним пристроєм із роликів ланцюгом, що формує множинні локальні контакти «ролик – оболонка».

Кожен ролик коректно інтерпретується як циліндричний штамп, який накладає локальний контактний тиск на тонкостінну трубу. Відповідно, прикладна задача зводиться до зв'язаної контактної задачі для системи циліндричних штампів на циліндричній оболонці.

Модель враховує геометрію труби, радіус і крок роликів, схему навантаження та умови контактної взаємодії, що дає змогу оцінити поля контактних та еквівалентних напружень у зоні підйому. Показано, що взаємодія роликів з

газопроводом спричиняє додаткові локальні напруження в тонкостінній трубі, що слід враховувати при загальній оцінці міцності.

На рис. 1 подано схему взаємодії труби газопроводу з роликami підйомного ланцюга. У перерізі, який контактує з ланцюгом підйомника, підйомна сила зрівноважує впливи об'ємних і експлуатаційних навантажень та сили пружності, які виникли внаслідок згину трубопроводу. Ці впливи представлено усередненим інтегральним еквівалентом  $\tau$ .

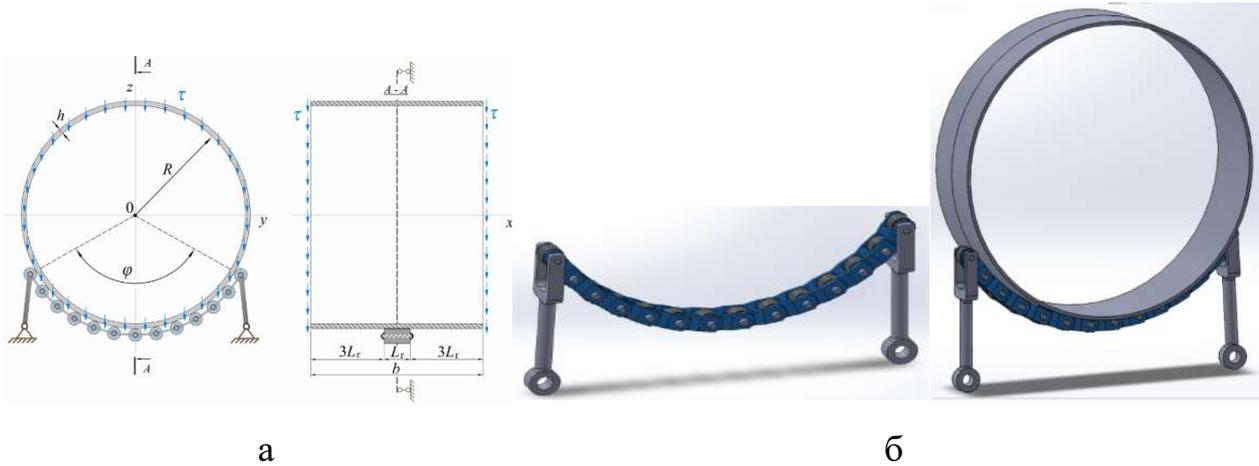


Рис. 1. Схема взаємодії труби газопроводу з роликami підйомного ланцюга (а), 3D модель взаємодії підйомника з трубою (б)

Вважали, що це навантаження  $\tau$  має вертикальний напрям та розподілене по площі двох крайніх поперечних перерізів виділеного елемента труби. Розглянемо один з реальних виробничих прикладів. Площа поперечного перерізу труби складає  $524,38 \text{ см}^2$  (діаметр труби – 1220 мм, товщина стінки труби – 14 мм), а максимальне підйомне зусилля 300 кН, відповідно отримали  $\tau = 0,5(300/524,4)10^7 = 2,86 \text{ МПа}$ .

При розробці скінченно-елементної моделі розрахункова сітка для труби газопроводу була згенерована за допомогою «Tetrahedrons method» (середня довжина ребра елемента 10 мм), для роликів ланцюга – методом «Hex Dominant» (середня довжина ребра елемента 2 мм). Опис контакту пари ролик – труба: тип контакту – «Frictional» з коефіцієнтом тертя 0,1; формулювання контакту – «Augmented Lagrange method»; допуск проникнення 0,0015; коефіцієнт нормальної

жорсткості – «program controlled». У термінах контактної механіки кожен ролик розглядається як циліндричний штамп, що навантажує тонкостінну циліндричну оболонку. Найбільші еквівалентні напруження виникали в місцях контакту нижніх роликів підйомного ланцюга з поверхнею труби (рис. 2).

У напрямку від нижніх роликів до верхніх еквівалентні напруження поступово зменшуються, а в зоні самого верхнього ролика спостерігається невеликий стрибок напружень. Ми розпочали віртуальні експерименти для випадку, коли кут охоплення труби вантажопідйомним ланцюгом становив  $\varphi = 120^\circ$  (рис. 2, а). При цьому максимальні значення еквівалентних напружень виникали на зовнішній поверхні труби і становили 124 МПа. Напруження вимірювалися інструментом “probe” безпосередньо на контактній плямі. Поступове збільшення кута захоплення супроводжувалося зменшенням максимальних еквівалентних напружень. Зокрема, при  $\varphi = 180^\circ$  найбільші еквівалентні напруження дорівнювали 92 МПа (рис. 2, б).

Для оцінки контактних напружень в парах ролик – труба використовувалися локальні системи координат, що відповідають кожному окремому ролику. В області плями контакту між кожним роликом і трубою вимірювалися максимальні нормальні напруження в напрямку, перпендикулярному до поверхні контакту. На рис. 3 наведено діаграму значень нормальних контактних напружень між роликами підйомного ланцюга і поверхнею труби.

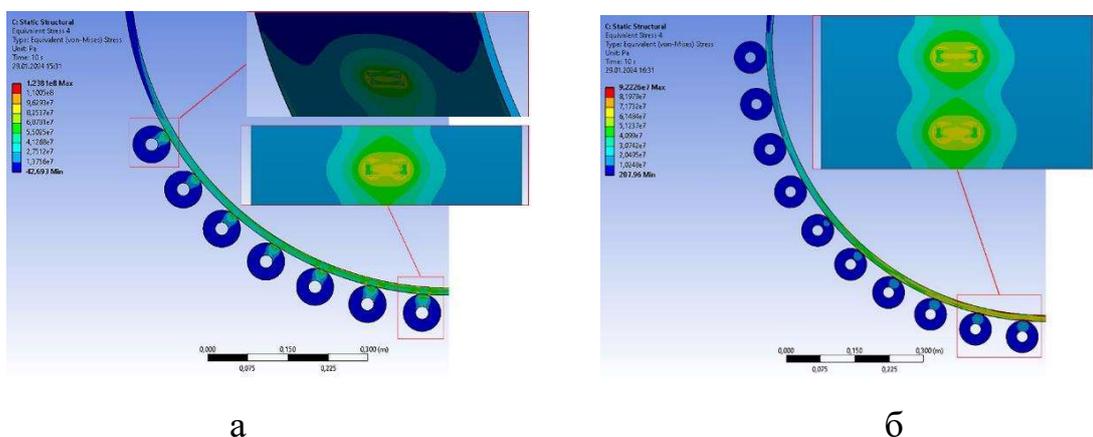


Рис. 2. Хромограма додаткових еквівалентних напружень, визначених за теорією Губера-Мізеса: а – кут охоплення  $\varphi = 120^\circ$ ; б – кут охоплення  $\varphi = 180^\circ$

Номер 1 присвоєно найнижчому ролику, а діаграма побудована для половини системи. Найбільші абсолютні значення контактних напружень спостерігаються в зоні нижніх роликів. При переході від нижнього ролика до верхнього абсолютні значення контактних напружень поступово зменшуються. В області верхнього ролика, який з'єднаний з опорним стрижнем (див. рис. 1), спостерігається зростання контактного напруження.

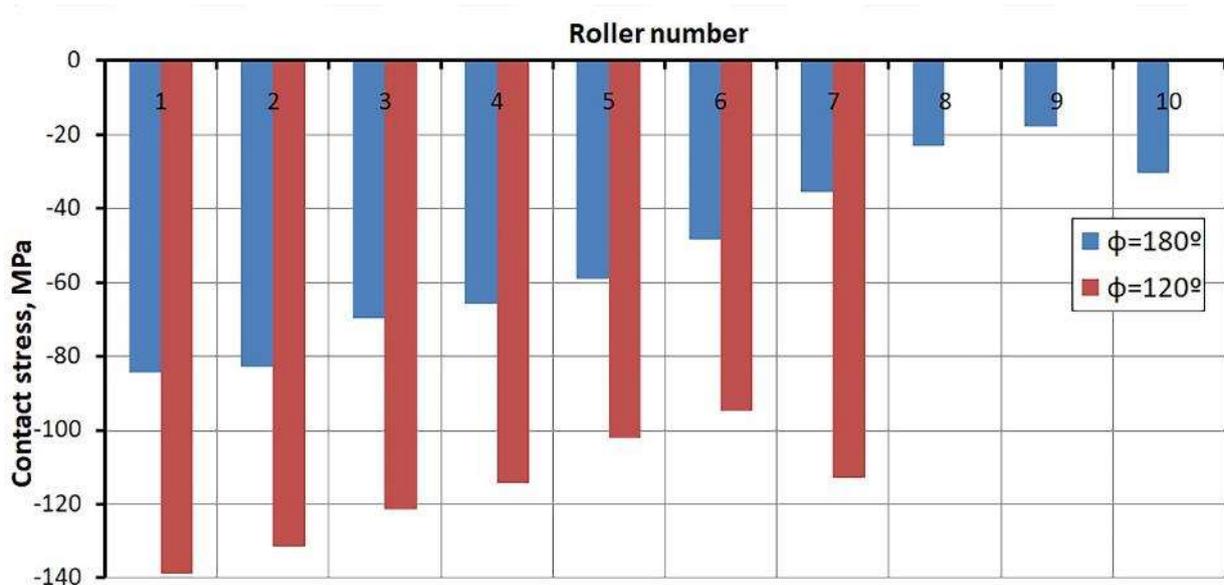


Рис. 3. Нормальні контактні напруження між роликом і поверхнею труби

Для зони найбільш навантаженого ролика на рис. 4 ми зобразили розподіл додаткових кільцевих напружень в трубі по довжині зони контакту ролика з газопроводом. Тут вісь абсцис суміщена з лінією контакту, а початок координат знаходиться на середині цієї лінії (ширина ролика становить 49 мм). При  $\varphi = 180^\circ$  на внутрішній поверхні труби максимальне значення додаткових кільцевих напружень розтягу становить 19,1 МПа (на зовнішній поверхні труби спостерігаються стискаючі кільцеві напруження 104 МПа).

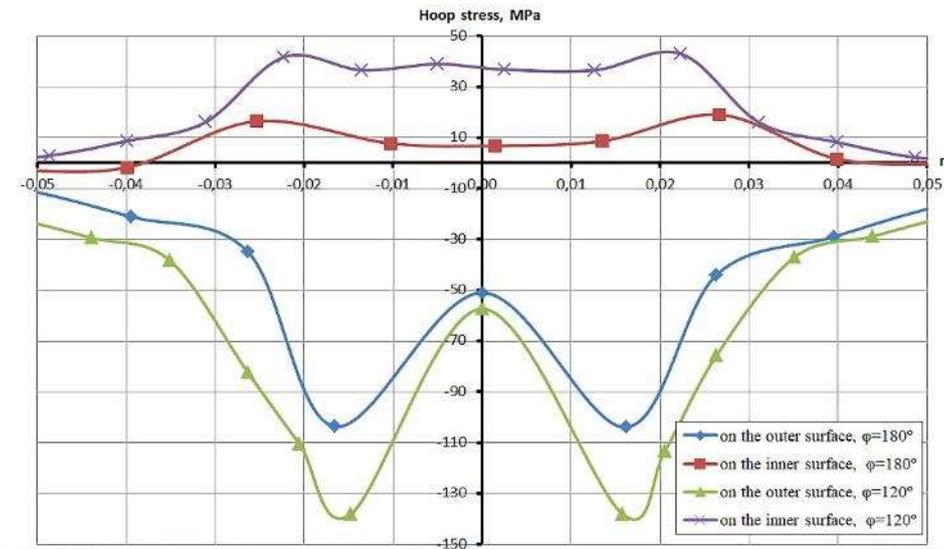


Рис. 4. Розподіл додаткових кільцевих напружень в трубі по довжині зони контакту ролика з газопроводом

Зауважимо, що ремонт відбувається без зупинки транспортування газу і трубопровід перебуває під дією штатного внутрішнього тиску 4 МПа, який викликає в матеріалі труби розтягуючі кільцеві напруження 174 МПа. В результаті сумарні кільцеві напруження на зовнішній поверхні трубопроводу зменшуються до 70 МПа, а на внутрішній поверхні – зростають до 193,1 МПа.

Найбільший внесок у локальний напружений стан дають кільцеві напруження, які на внутрішній поверхні труби додаються до штатних від тиску газу. Максимальні еквівалентні напруження зосереджуються в зонах контакту нижніх роликів і за малого кута охоплення можуть перевищувати допустимі значення. Збільшення кута охоплення знижує ці напруження, гарантуючи безпеку навіть за максимального зусилля підйому.

Зауважимо, що новизна нашого підходу полягає у зв'язаному числовому описі системи «роликовий ланцюг – оболонка» з чіткими інженерними критеріями допустимості підйому, придатними для швидкої перевірки технологічних режимів ремонту. Крім того, запропоновану модель легко поширити на споріднені контактні задачі.