

УДК 669.1.017.548.735.6

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.280323.8.939

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ТРУБАХВАХРУШЕВА В. С.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,МАЛИШ О. Д.², ст. наук. співроб.,ГРУЗИН Н. В.³, канд. техн. наук., доц.^{1*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: vs062@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714² Державне підприємство «Науково-дослідний інститут трубної промисловості», вул. Писаржевського, 1-а, 49600, Дніпро, Україна³ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: hruzin.nataliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7589-6548

Анотація. Мета роботи: удосконалення та виклад методики оцінювання тангенціальних та осьових залишкових напружень у холоднодеформованих трубах та трубах після термічної обробки методом М. М. Давиденка. **Методи досліджень:** метод М. М. Давиденка розрізання кілець та вирізання смуг із труб. Розрахунки залишкових напружень. **Результати.** Удосконалено та наведено методику оцінювання тангенціальних та осьових залишкових напружень у трубах після холодної деформації та після термічної обробки. Наведено формули розрахунку залишкових напружень. **Практичне значення.** Трубним заводам для розроблення технологічних процесів виготовлення нових видів труб та для виконання стандартів на труби потрібна оцінка залишкових напружень. Удосконалена та викладена методика допоможе виробникам в оцінюванні залишкових напружень. **Висновки.** Розглянуто сучасні методи оцінювання залишкових напружень. Наведено методику розрахунку тангенціальних та осьових залишкових напружень за М. М. Давиденком розрізанням кілець та вирізанням смуг із металу досліджуваних труб. Методика офіційно зареєстрована, що дозволяє застосовувати її для офіційного оцінювання якості труб.

Ключові слова: залишкові напруження; метод М. М. Давиденка; тангенціальні та осьові залишкові напруження

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN PIPESVAKHRUSHEVA V.S.^{1*}, Ph. D., Prof.,MALYSH O.D.², Sen. Res.,HRUZIN N.V.³, Cand. Sc. (Tech), Assoc. Prof.^{1*} Department of Materials Science and Materials Processing, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: vs062@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714² State Enterprise “Research and design-technology institute of the tube industry”, 1-a, Pysarzhevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine³ Department of Materials Science and Materials Processing, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: hruzin.nataliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7589-65487

Abstract. During production, operation, transportation, and aging of finished products, stresses occur in the pipe metal. As a rule, these residual stresses affect the quality of pipes. The presence of residual stresses in products can cause brittle fracture, cracking due to corrosion, reduced elasticity, warping, etc. The development of methods for managing residual stresses in metals and products is the realization of a powerful reserve for improving the quality of metal products, which means increasing the reliability of machinery. The question arises as to which method, convenient in production conditions, should be used to assess residual stresses. A simple and affordable method for estimating residual stresses is needed in production conditions. This paper presents a simplified method for estimating residual stresses in pipes. **The purpose of the work** is to improve and present a methodology for estimating tangential and axial residual stresses in cold-formed pipes and tubes after heat treatment according to the method of M.M. Davydenko. **Research methods:** M.M. Davydenko's method for cutting rings and cutting strips from pipes. Calculation of residual stresses. **Results.** The method for estimation of tangential and axial residual stresses in pipes after cold deformation and after heat treatment is improved and presented. The formulas for calculating residual stresses are given. **Practical value.** Pipe plants need to estimate residual stresses to develop technological processes for the manufacture of new types of pipes and to meet pipe standards. The improved and presented methodology will help

manufacturers in assessing residual stresses. **Conclusions.** Modern methods for assessing residual stresses have been considered. A methodology for calculating tangential and axial residual stresses according to M.M. Davydenko by cutting rings and cutting strips from the metal of the studied pipes is presented. The methodology is officially registered, which allows it to be used for official assessment of pipe quality.

Keywords: residual stresses; M.M. Davydenko's method; tangential and axial residual stresses

Вступ

У процесі виробництва, експлуатації, транспортування під час вилежування готової продукції виникають напруження у металі труб. Як правило, ці залишкові напруження відіграють негативну роль в якісних показниках труб. Наявність залишкових напружень у виробках може викликати крихке руйнування, розтріскування внаслідок корозії, зниження межі пружності, жолоблення тощо.

Так, для газопровідних труб показано, що залишкові напруження вносять значні зміни в розподіл напружень у тілі труби, що викликані внутрішнім тиском [1; 2]. Але іноді залишкові напруження стискного характеру можуть відігравати і позитивну роль, наприклад, підвищувати вібраційну та втомну міцність. Тому автори праці [3] вважають, що розроблення методів управління залишковими напруженнями у металах та виробках – це реалізація можливостей потужного резерву підвищення якості металопродукції, а значить, підвищення надійності техніки.

Залишкові напруження – це напруження, пов'язані з пружними деформаціями, які існують у металі після повного припинення зовнішніх впливів на метал. Згідно з найбільш вдалою класифікацією М. М. Давиденка [4], існують залишкові напруження трьох родів, які відрізняються об'ємами, де вони врівноважуються. Напруження першого роду (макронапруження), врівноважуються у макроскопічних об'ємах, часто в об'ємах усього зразка чи деталі. Напруження другого роду (мікронапруження) врівноважуються в об'ємах одиничних кристалів і частинок кристалітів, що містяться між діючими площинами ковзання. Початковий термін «напруження третього роду», які врівноважуються у межах декількох груп атомів, поступово

змінили на термін «статичні спотворення кристалічної решітки», що зумовлені полями деформацій, пов'язаних із точковими дефектами, дислокаціями [5].

Найбільші залишкові напруження лежать у поверхових шарах, де напружений стан близько до двовісного. Тоді можливо рахувати, що найбільші залишкові напруження :

$$\sigma_{ост} \leq 1.15 \sigma_T.$$

Найбільш поширений спосіб визначення залишкових напружень у трубах – механічний спосіб розрізання кілець. У промислових умовах метод розрізання кілець націлений на визначення окружних напружень біля стінки труби. Позитивні значення $\sigma_{ост}$ відповідають напруженням розтягу, а негативні – стиску.

У цій статті розглянуто напруження першого роду стосовно холодно-деформованих труб. Залишкові напруження першого роду виникають за дії деформації, неоднорідного нагрівання або охолодження, під час фазових та структурних перетворень.

Для розроблення нових технологічних процесів виготовлення труб із різних металів та сплавів часто замовник вимагає оцінити рівень залишкових напружень, на цій основі вибрати режими термічної обробки. Так, у разі виготовлення труб із сплаву титану замовник потребує поставки труб у стані CWSR (холодна прокатка + низькотемпературна термічна обробка для зняття залишкових напружень) [6].

Вибір режимів термічної обробки передбачає оцінювання залишкових напружень у трубах. Виникає питання, яким методом, зручним в умовах виробництва, слід оцінити залишкові напруження.

В умовах виробництва потрібен простий та доступний метод оцінювання залишкових напружень. Найбільш універсальні методи оцінювання напружень такі: механічні,

рентгенівські, ультразвукові, хімічні, магнітні, поляризаційно-оптичні та термічні.

Механічні методи отримали широке застосування у визначенні напружень у прутках, дроті, трубах після холодної деформації. І. А. Біргер систематизував та математично обґрунтував механічні методи визначення залишкових напружень у деталях найбільш поширених форм [7].

Метод М. М. Давиденка розрізання кілець, придатний для оцінення залишкових напружень у порожніх циліндрах і трубах, вважається класичним.

У Науково-дослідному та конструкторсько-технологічному інституті трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади (ДП НДТІ) розроблено та затверджено спрощену «Методику визначення залишкових

напружень у трубах» МВВ 244-74-13 [8]. Вона передбачає визначення залишкових напружень тангенціальних (σ_t) та осьових (σ_s) у металевих трубах діаметром від 20 мм до 250 мм і товщиною стінки від 1 мм до 10 мм за кімнатної температури (20_{-10}^{+15}) °С. Методика удосконалена для зручного розрахунку.

Визначення тангенціальних напружень методом М. М. Давиденка

Для визначення тангенціальних напружень цим методом застосовують зразки у вигляді кілець довжиною 12 мм (рис. 1) у кількості трьох штук від однієї труби. Кільця шліфують з двох сторін, при цьому сторони повинні бути строго паралельні.

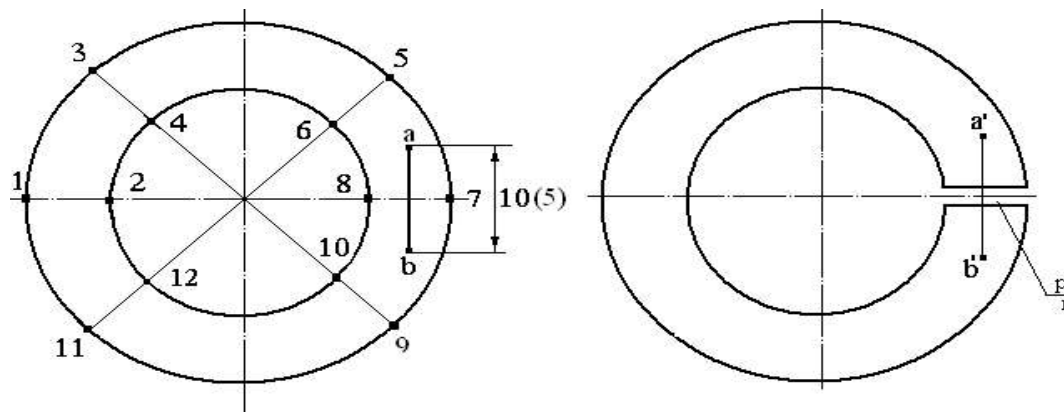


Рис. 1. Кільцевий зразок для визначення залишкових тангенціальних напружень у трубах

Перед замірами зразків проводять їх розмітку, наносять мітки в точках a і b ($ab = 5$ мм для труб діаметром до 50 мм; $ab = 10$ мм для труб діаметром понад 50 мм (рис. 1). Для цього проводять перпендикуляр до діаметра у середині товщини стінки і проводять кернення у точках a і b . Заміри виконують на інструментальному мікроскопі з похибкою 0,001 мм. Заміряють $D_{\text{зовн}}$ (зовнішній діаметр труби у точках 1–7, 3–9, 5–11) і визначають $D_{\text{зовн}}$ середнє. Заміряють $D_{\text{внут}}$ (внутрішній діаметр труби) у точках 2–8, коло D_k ср.

Далі заміряють середню товщину стінки S між точками 1–2, 3–4, 5–6, 7–8, 9–10, 11–12 і визначають середню товщину стінки кільця $S_{\text{ср}}$; заміряють відстань між точками a і b фактичну до розрізання кільця.

Виконують одностороннє розрізання кільця фрезою (товщина фрези не більше 2 мм) по лінії 7–8 строго перпендикулярно до стінки кільця (розрізання вести на мінімальних оборотах із мінімальним поданням та з охолодженням). Після розрізання кільця визначають відстань $a^1 b^1$.

Розрахунок тангенціальних напружень σ_t :

- визначити зміну відстані між кернами:

$$\pm \Delta S = a^1 b^1 \pm ab;$$

- визначити зміну діаметра кільця після розрізання ΔD :

$$\pm \Delta D = \frac{\Delta S}{\pi};$$

- за формулою розрахувати тангенціальні напруження:

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{1 + \frac{\delta_{ср.}}{3 \cdot D_{0ср.}}}{D_{0ср.} \cdot (1 + \frac{D_{0ср.}}{\delta_{ср.}})} \cdot (\pm \Delta D)$$

де E – модуль пружності (для вуглецевої сталі $1,8-2,1 \times 10^5$), Н/мм²; μ – коефіцієнт Пуассона для даної марки сталі (0,28–0,3); $D_{0\text{ ср}}$ – діаметр середньої окружності до розрізки, мм; $\delta_{\text{ср}}$ – середня товщина стінки кільця, мм; ΔD – зміна діаметра кільця після розрізки, мм.

$$\frac{E}{1-\mu^2} = \frac{2,1 \cdot 10^5}{1-0,3^2} = 230770$$

Ці розрахунки виконують для кожного з трьох кілець.

Визначення осевого напруження.

Вид зразків та вимоги до їх виготовлення

Від труби відрізають патрубок довжиною 100 мм, шліфують з двох сторін по торцях, при цьому сторони повинні бути строго паралельними (рис. 2). Заміряють мікрометром товщину стінки труби t (рис. 2).

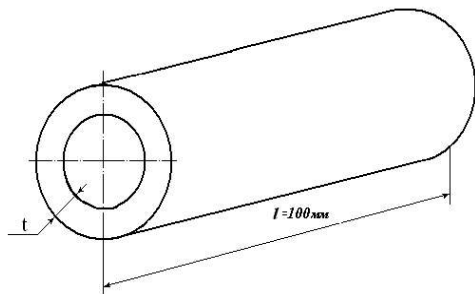


Рис. 2. Розмір патрубку до вирізання стрічки

Потім механічним способом за допомогою фрези товщиною не більше 2 мм вирізають уздовж осевої лінії три смуги шириною 10 мм. Вирізані смуги викривляються внаслідок неоднакових осевих напружень по їх товщині та довжині (рис. 3).

Заміряють на інструментальному мікроскопі довжину кожної смуги l_{ab} (між точками a і b) і l_{cd} (між точками c і d).

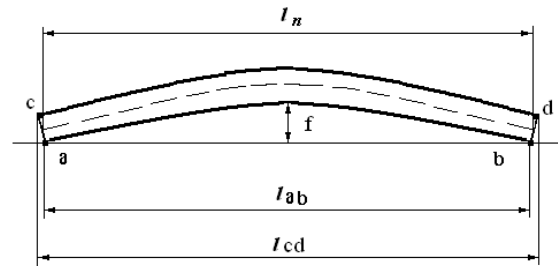


Рис. 3. Смуга після вирізання

Визначають довжину смуги l_{Π} по середній лінії :

$$l_{\Pi} = \frac{l_{ab} + l_{cd}}{2}, \text{ мм.}$$

На інструментальному мікроскопі заміряють стрілу прогину f .

Розрахунок осевих напружень

Осьове напруження труби визначають за формулою:

$$\sigma_s = \frac{E \cdot t \cdot f}{L^2 (1 - \mu)} \text{ Н/мм}^2$$

де E – модуль пружності (для вуглецевої сталі $1,8-2,1 \times 10^5$), Н/мм²; μ – коефіцієнт Пуассона для даної марки сталі (0,28–0,3); f – стріла прогину смуги, мм; t – товщина стінки труби, мм; L – половина довжини смуги l , мм.

Розрахунок виконують для кожної з трьох смуг.

Метод «язичка». Виготовлення зразків

Для визначення осевого напруження методом «язичка» на патрубку довжиною 50–100 мм відділяють від стінки труби (прорізають із трьох сторін) поздовжній «язичок». Схема та розташування «язичка» наведені на рисунку 4.

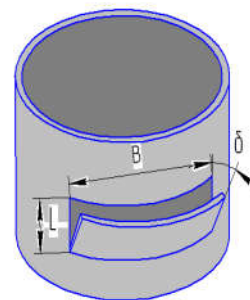


Рис. 4. Схема і розташування «язичка»

Довжина «язичка» L повинна бути не менше 15 мм, а ширина 0,1–0,2 від зовнішнього діаметра труби. «Язичок» вирізають посередині довжини зразка-патрубка, не з самого краю. Вирізання виконують електроіскровим методом або на верстатах із дотриманням заходів (охолодження та режимів різання), що виключають зміну властивостей металу під час нагрівання, наклепу, деформації, які виникають у процесі механічної обробки.

Вимірювання зразків

Виконують до вирізання «язичка» наступним чином: товщину стінки зразка-патрубка заміряють у двох місцях у місці вирізання «язичка» з похибкою не більше 0,01 мм. Середнє з двох вимірювань приймають за товщину стінки.

Після вирізання «язичка» довжину L вимірюють штангенциркулем або іншим способом, який забезпечує похибку вимірювань не більше 0,05 мм; відхилення «язичка» δ вимірюють на інструментальному мікроскопі з похибкою не більше 0,01 мм.

Розрахунок осьового напруження σ_s проводять за формулою:

$$\sigma_s = \frac{E \cdot S \cdot \delta}{L^2 (1 - \gamma^2)} \text{ Н/мм}^2$$

де σ_s – осьове залишкове напруження; E – модуль пружності (для сталей $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$); S – товщина стінки зразка-патрубка; δ – відхилення язичка, мм; L – довжина язичка, мм; γ – коефіцієнт Пуассона (для сталей $\gamma = 0,3$).

Обробка результатів вимірювань

За результатами випробувань трьох зразків у вигляді кілець розраховують середнє арифметичне значення тангенціальних напружень σ_t , а за результатами випробувань трьох смуг – середнє арифметичне значення осьових напружень σ_s .

Висновки

Розглянуто сучасні методи оцінювання залишкових напружень. Наведено сучасну класифікацію залишкових напружень; методику розрахунку тангенціальних залишкових напружень за М. М. Давиденком розрізанням кілець від досліджуваних труб, а також методику розрахунку осьових залишкових напружень під час вирізання смуг із металу досліджуваних труб та методику «язичка».

Методика офіційно зареєстрована, що дозволяє застосовувати її для офіційного оцінювання якості труб в умовах виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сичов Ю. С. Вплив залишкових напружень на втомну міцність бурильних труб. *Науковий вісник ФНГУНТ*. 2014. № 2 (37). С. 97–110.
2. Репин Д. Г., Лисин В. Н., Спиридович Е. Н., Никитина Н. Т. Влияние технологии изготовления труб большого диаметра на возможность КРН. *Газовая промышленность*. 2008. № 3. С. 63–68.
3. Вишняков Я. Д., Писарев В. Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. Москва : Металлургия, 1989. 255 с.
4. Буркин С. П., Шимов Г. В., Андрюкова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции : учеб. пособ. Екатеринбург : изд-во Уральского университета, 2015. 248 с.
5. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах : монография. Москва, 1962. 495 с.
6. AMS 4946. Titanium alloy tubing, seamless, hydraulic 3A1–2,5V, controlled contractile strain ratio, cold worked, stress relieved. SAE International. 2006.
7. Биргер И. А. Остаточные напряжения : монография. Москва : Машгиз, 1963. 232 с.
8. Методика МВИ 244-74-13. Определение остаточных напряжений в трубах. Днепропетровск, 2013. 8 с.

REFERENCES

1. Sychev Yu.S. *Vplyv zalushcovuch naprugen na vtomny micnist burilnych trub* [The effect of residual stresses on the fatigue strength of drill pipes]. *Naykovyy vicnik FNGUNT* [Scientific Bulletin of the FNUGNT]. 2014, no. 2 (37), pp. 97–110. (in Ukrainian).
2. Repin D.G., Lisin V.N., Spiridovich E.N. and Nikitina N.T. *Vliynie technologii izgotovleniy trub volshogo diametra na vozmozhnoost KRN* [Influence of manufacturing technology of large-diameter pipes on the possibility of SCC]. *Gasovay promushlennost* [Gas Industry]. 2008, no. 3, pp. 63–68. (in Russian).

3. Vyshnyakov Y.D. and Pisarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallach i cplavach* [Management of residual stresses in metals and alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1989, 255 p. (in Russian).
4. Burkin S.P., Shimov G.V. and Andryukova E.A. *Ostatochnyye napryazheniya v metalloproduksii : uchebnoye posobiye* [Residual stresses in metal products : a tutorial]. Ekaterinburg : Ural. University Publ., 2015, 248 p. (in Russian).
5. Van Buren. *Defects v crystals : monografiya* [Defects in crystals : monograph]. Moscow, 1962, 495 p. (in Russian).
6. AMS 4946 C. Titanium alloy tubing, seamless, hydraulic 3A1–2,5V, controlled contractile strain ratio, cold worked, stress relieved. SAE International. 2006.
7. Birger I.A. *Ostatochnyye napryazheniya : monografiya* [Residual stresses : monograph]. Moscow : Mashgiz Publ., 1963, 232 p. (in Russian).
8. *Metodika MVI 244-74-13. Opredelenie octatochnuch naprjzhenii v trubach* [Methodology MVI 244-74-13. Determination of residual stresses in pipes]. Dnipropetrovsk, 2013, 8 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 03.03.2023.