



УДК 621.787

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES DURING DEFORMATION OF CYLINDRICAL PARTS

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Ivankova O.V. / Іванкова О. В.*s. t. s. as. prof / к. т. н., доц.*

ORCID ID (0000-0003-1825-0262)

ResearcherID (Q-6470-2016)

Kisil Yu.Yu. / Кисіль Ю.Ю.*Poltava State Agrarian University, 1/3, Skovorody str., Poltava, 36000, Ukraine**Полтавський державний аграрний університет, Полтава, в. Сковороди 1/3, 36003***Fedin V.O. / Федін В.О.***Poltava State Agrarian University, 1/3, Skovorody str., Poltava, 36000, Ukraine**Полтавський державний аграрний університет, Полтава, в. Сковороди 1/3, 36003*

Анотація. Завданням галузі технічного сервісу є підвищення роботоздатності машин і механізмів.

Розробка та впровадження високопродуктивних технологій відновлення зношених деталей машин дозволить вирішити це завдання. Технологія роздачі зношених деталей машин є однією з продуктивних та доступних. Вивчення процесу роздачі порожнистих деталей включають дослідження напруженого стану матеріалу деталей.

Підприємствам технічного сервісу для розробки нових та удосконалення технологічних процесів відновлення зношених деталей техніки пластичним деформуванням потрібна оцінка залишкових напружень. З'ясування розміщення (напрямку) і величини внутрішніх напружень у деталях, що були деформовані є актуальним питанням.

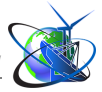
Розглянуто сучасні методи оцінювання залишкових напружень у матеріалі пластично деформованих деталей. Проаналізовано методіку розрахунку тангенціальних та осевих залишкових напружень, розроблену М. М. Давиденком, яка ґрунтується на розрізанні кілець та вирізанні полосок із досліджуваних циліндричних зразків.

Ключові слова: технічний сервіс, пластичне деформування, роздача, залишкові напруження, методика визначення, розрахунок.

Постановка проблеми

Завдання досягнення високої надійності деталей машин нерозривно пов'язане із можливістю ефективного керування властивостями матеріалу.

Велика кількість деталей сільськогосподарської техніки, зокрема, двигунів внутрішнього згорання працює в умовах доволі жорстких циклічних навантажень та інтенсивного тертя. Тому, зміцнення поверхонь саме таких деталей видається одним із важливих шляхів у досягненні рівня довговічності деталей. В цьому зв'язку постає питання оптимізації параметрів: твердості, зносостійкості, наявності і характеру внутрішніх напружень. Застосування



сучасних методів зміцнення та прогресивних технологій обробки деталей дозволяє досягнути підвищення важливих параметрів.

У літературних джерелах є велика кількість результатів проведених досліджень з відомостями про вимоги до параметрів зміцненого шару деталей [1,2]. Обґрунтована доцільність досягнення певного значення величини твердості та залишкових напружень матеріалу деталей, які відповідали б експлуатаційним вимогам.

В сучасних реаліях виробництва особливу увагу привертають методи зміцнення деталей машин із застосуванням пластичного деформування.

Механізм пластичної деформації характеризують параметри статичної або динамічної схем деформування.

В літературних джерелах, висвітлюються переважно використання технологій зміцнення шляхом пластичного деформування окремих видів деталей при їх виготовленні. Застосування ж пластичного деформування у галузі технічного сервісу при відновленні деталей машин висвітлено недостатньо.

Пластичне деформування можна здійснювати через різноманітні схеми навантаження деталей. Одним із найменш вивчених параметрів, які характеризують механізм процесу деформації є залишкові напруження матеріалу деталей з різними схемами деформування деталей.

Залишкові напруження, що існують в металі після припинення дії зовнішніх сил, мають вплив на матеріал деталі, разом з напруженнями, які виникають від експлуатаційних навантажень [1,3,4].

Літературні джерела містять дані, які ґрунтуються на результатах експериментальних досліджень і на досвіді експлуатації деталей машин, що вказують, що залишкові напруження впливають на міцність, стійкість до корозії, зносостійкість та на довговічність деталей. Поверхневі шари деталі при виготовленні отримують залишкові напруження при механічній обробці, литті, термічній та хіміко-термічній обробці, обробці тиском – пластичному деформуванні, зварюванні та нанесення покриттів. Наявність у деталях зон із різним ступенем деформації, наприклад, через різну товщину стінок деталей,



неоднорідність нагрівання, або хімічного складу матеріалу, може бути причиною виникнення внутрішніх напружень [3].

Під дією зовнішнього (технологічного) навантаження поверхневий шар деталей перебуває в більш жорстких умовах, ніж внутрішні. В поверхневих шарах створюються більш сприятливі умови для пластичної деформації, ніж у серцевинних шарах.

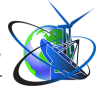
Під дією експлуатаційних навантажень поверхневий шар деталі отримує також несприятливі умови, так як експлуатаційні напруження в деталі можуть додаватися до технологічних залишкових напружень. Результатом можуть стати суттєві зміни характеру напруженості в поверхневому шарі. Зростання результуючих напружень, що діють в експлуатації, приводить до зміни розташування напружень по перетину деталі. Якщо мають місце знакозмінні експлуатаційні навантаження, технологічні залишкові напруження викликають суттєву асиметрію циклу навантаження, які теж негативно відображаються на роботоздатності деталі. Якщо поверхневі шари деталі мають розтягуючі технологічні залишкові напруження, а при експлуатації з'являються розтягуючі або знакозмінні напруження, то у поверхневих шарах деталі можуть утворитися мікротріщини, або розкриються вже наявні мікропори. Це може спричинити руйнування деталі. Залишкові поверхневі напруження розтягу інтенсифікують процес корозії [4].

Вплив залишкових внутрішніх напружень на якість відновлених деталей все ще недостатньо досліджений. Тому, механізми пластичного деформування при ремонті деталей машин потребують проведення додаткових самостійних досліджень.

Метою наших досліджень є дослідження впливу на міцність деталей машини залишкових напружень в деталях після їх пластичного деформування

Для досягнення мети потрібно вирішити такі завдання:

- проаналізувати методи експериментального дослідження внутрішніх залишкових напружень при пластичній деформації деталей типу втулок;
- вивчити вплив залишкових внутрішніх напружень матеріалу на властивості



деформованих деталей

Результати досліджень.

Ми провели аналіз існуючих методів експериментального визначення величини залишкових внутрішніх напружень в деталях типу втулок.

Сьогодні при вивченні та оцінці характеру розподілу та величини залишкових напружень в деталях використовують: механічні, рентгенівські, ультразвукові, хімічні, магнітні, поляризаційно-оптичні методи[5,6,7,8].

Механічні методи визначення характеру залишкових внутрішніх напружень мають досить широке застосування для напружень в прутках, дротах, трубах (циліндричних деталях) після їх холодної деформації. І. А. Біргером було систематизовано і зроблено математичне обґрунтування механічних методів визначення залишкових напружень у матеріалі таких деталей [3]. Кожний з них характеризується високою точністю, а також вимагають складного обладнання і громіздких розрахунків.

З аналізу літературних даних ми встановили, що найширше практичне застосування знайшли механічні методи визначення внутрішніх напружень - Г. Закса та М.М. Давиденка [6,7].

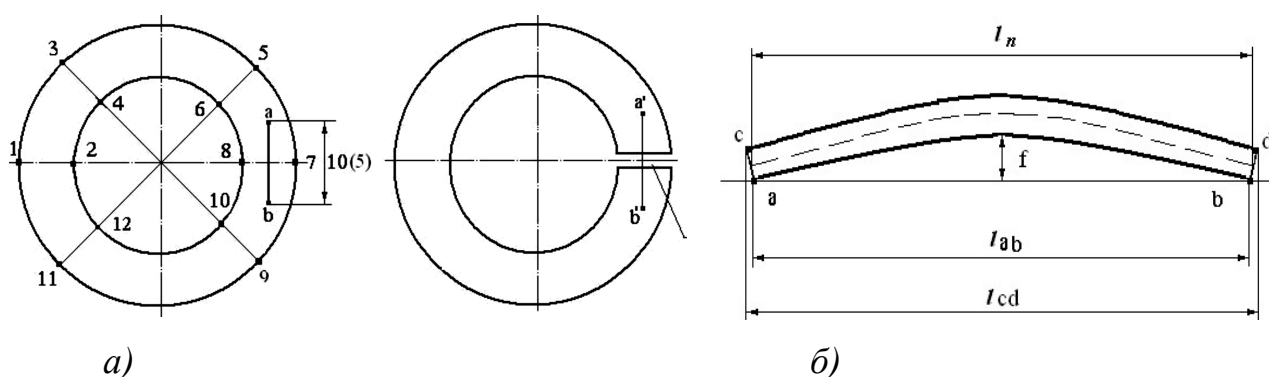
На кафедрі агроінженерії та автомобільного транспорту ПДАУ тривалий час вивчаються можливості використання процесів пластичного деформування при відновленні зношених деталей машин для підвищення їх надійності.

Пластичному деформуванню підлягали порожнисті циліндричні зразки. У якості інструменту використовували пуансони з інструментальної сталі, що мали різні кути нахилу твірної конуса: 10° , 11° та 12° [9,12].

Залишкові внутрішні напруження, які формуються у матеріалі деталей, обмежують використання процесу роздачі [9]. Вплив внутрішніх напружень є дуже важливим, у випадку, коли ці деталі повинні мати наступну механічну або термічну обробку. Так як виконання механічної і термічної обробки деталей супроводжується порушенням рівноваги внутрішніх напружень, їх перерозподілом, і, як наслідок, можливою втратою точності розмірів, форми та розміщення поверхонь деталей [10,11].



Метод Г. Закса має дуже високу трудомісткість експериментальних досліджень при визначенні колових залишкових напружень. Тому було вирішено використати метод М.М. Давиденка [7]. Згідно цієї методики дослідження залишкових внутрішніх напружень обмежується розрізанням зразка вздовж твірної, без наступного зняття шарів (рис. 1).



**Рисунок 1 – а). кільцевий зразок для визначення тангенціальних залишкових напружень у циліндричному сталевому зразку;
б). вирізана полоска**

Джерело 7

Визначення **осьового** напруження. Циліндричний зразок був розрізаний на декілька частин. Довжина однієї частини складала 50 мм. Торці були прошліфовані з обох країв. Торці кожної частини були чітко паралельні. Товщину стінки циліндра (t) вимірювали мікрометром. Уздовж осьової лінії фрезою (товщиною 2 мм) були вирізані три полоски (кільця) шириною 10 мм.

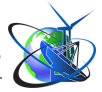
Ці вирізані полоски викривились по товщині та довжині внаслідок дії неоднакових осьових напружень. Були заміряні на інструментальному мікроскопі довжина кожної з них l_{ab} і l_{cd} (рис.1).

Визначили довжину полоски l_n по середній лінії :

$$l_n = \frac{l_{ab} \pm l_{bc}}{2}, \text{ мм.} \quad (1)$$

На інструментальному мікроскопі виміряли стрілу прогину полоски f .

Осьове напруження зразка визначили за формулою:



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

де E – модуль пружності для вуглецевої сталі;

μ – коефіцієнт Пуассона;

f – стріла прогину полоски, мм;

t – товщина стінки циліндра, мм;

L – половина довжини полоски l , мм.

Визначення тангенціальних напружень методом М. М. Давиденка

Із втулки вирізаються три кільця довжиною 12 мм (рис. 1). Сторони цих кілець повинні бути строго паралельні і прошліфовані.

Заміряється $D_{\text{внут.}}$ (внутрішній діаметр циліндричного зразка) у точках 2–8, коло $D_{\text{к ср.}}$ та середню товщину стінки S між точками і визначають середню товщину стінки кільця $S_{\text{ср.}}$. Після розрізання кільця визначають відстань $a^1 b^1$.

Розрахунок тангенціальних напружень σ_θ :

- визначили зміну відстані між мітками: $\pm \Delta S = a^1 b^1 \pm ab$;
- визначили зміну діаметра кільця після розрізання ΔD ;
- за формулою розраховали тангенціальні напруження:

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{1 + \frac{\delta_{\text{ср.}}}{3 \cdot D_{0\text{ср.}}}}{D_{0\text{ср.}} \left(1 + \frac{D_{0\text{ср.}}}{\delta_{\text{ср.}}} \right)} \cdot (+ - \Delta D) \quad (3)$$

де $E = 1,8\text{--}2,1 \times 10^5$ – модуль пружності, Н/мм²;

$\mu = 0,28\text{--}0,3$ – коефіцієнт Пуассона;

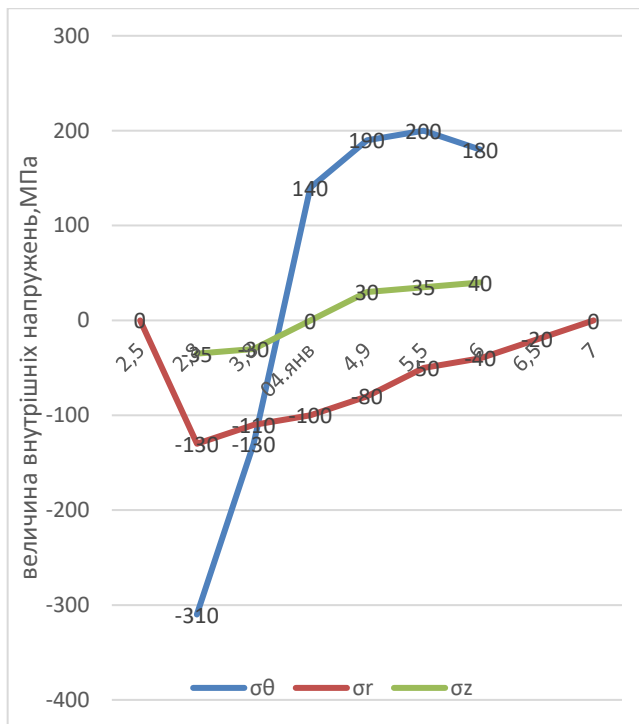
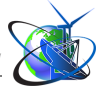
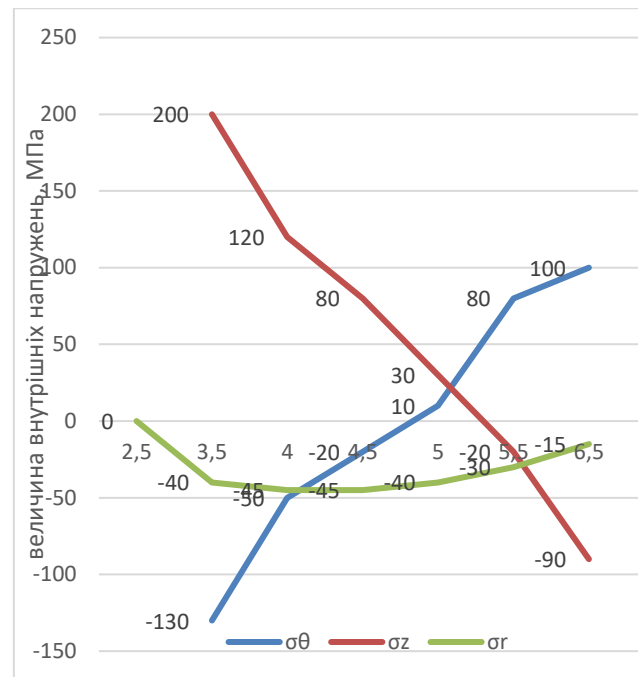
$D_{0\text{ср.}}$ – серединний діаметр кола до розрізки, мм;

$\delta_{\text{ср.}}$ – середня товщина стінки кільця, мм;

ΔD – зміна діаметра кільця після розрізки, мм.

Такі розрахунки виконувались для кожного з трьох кілець.

Результати досліджень залишкових напружень сталюї втулки приводимо у вигляді епюр (рисунок 2).

а) $a=0,9$ б) $a=7,1$

**Рисунок 2 – Епюри залишкових внутрішніх напружень, МПа
(радіальних σ_r , тангенціальних σ_θ , осьових σ_z) після роздачі зразків-
втулок**

Авторська розробка

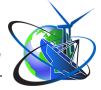
На основі аналізу побудованих епюр нами виявлено нерівномірність розподілу залишкових напружень вздовж осі в результаті роздачі циліндричних втулок.

Висновки

В результаті аналізу методів експериментального дослідження внутрішніх залишкових напружень при пластичній деформації деталей типу втулок був вибраний метод М. М. Давиденка як оптимальний для визначення внутрішніх напружень сталюого циліндричного зразка;

Дослідили зміну внутрішніх напружень при роздачі сталюих втулок та побудували епюри залишкових внутрішніх напружень.

Це дало змогу зробити висновок про те, що схема дії напружень матеріалу деталі змінюється у процесі пластичної деформації: в центрі деформування виникають розтягуючі осьові та стискаючі радіальні напруження металу.



Стискаючі залишкові напруження відіграють позитивну роль, бо підвищують втомну міцність. Розтягуючі напруження знижують втомну міцність, тобто, мають негативний вплив. При відновленні деталей машин із використанням пластичного деформування це дуже важливо. Тому, дослідження впливу внутрішніх напружень матеріалу на якість відновлених деталей потребує подальших досліджень.

Література:

1. Афтаназів І.С., Гавриш А.П., Киричок П.О. та ін. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: Навчальний посібник. Житомир: ЖІТІ, 2001. 516 с.
2. Іванкова О. В., Гаращук О. В., Куценко В. І., Щербина В. В., Чижевський Д. В., Бабич Я. В., Тіхонов М. О. Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. // *Вісник ПДАА*. 2020. № 4. С. 283–292. doi: 10.31210/visnyk2020.04.36
3. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Демченко М.О. Діагностика напружено-деформованого стану металевих конструкцій [монографія] / Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова, М.О. Демченко // Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. 168 с.
4. Сичов Ю. С. Вплив залишкових напружень на втомну міцність бурильних труб. *Науковий вісник ФНГУНТ*. 2014. № 2 (37). С. 97–110.
5. Дослідження залишкових напружень та деформацій методом ультразвукової акустичної тензометрії / В. В. Ступницький, Я. В. Долиняк // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2015. № 822. С. 58-66. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPO_2015_822_11
6. Skvortsov, V. F. Feasibility of the Davidenkov method for investigation of hoop residual stresses in cold expanded cylinders / V. F. Skvortsov, A. Yu. Arlyapov, A. O. Boznak, I. I. Ogol, A. B. Kim // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017 T. 177. № 012018. С. 1-6.
7. Вахрушева В. С., Малиш О. Д., Грузін Н. В. Визначення залишкових



напружень у трубах. *Металознавство та термічна обробка металів* № 1 (100), 2023. С. 8-13. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.280323.8.939

8. Schajer G.S. Practical Residual Stress Measurement Methods / G.S. Schajer. - New York: John Wiley & Sons, 2013. 320 p.

9. Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies / Anatolii Dudnikov, Olena Ivankova, Oleksandr Gorbenko, Anton Kelemesh // *Eastern-European journal of enterprisetechologies*. 2/1 (110) 2021. С. 104-108. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228606

10. Кирилів Я.Б. Визначення залишкових напружень після вібраційно-відцентрового зміцнення поверхонь деталей. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького* Том 10 № 3(38) Частина 3, С.409-420.

11. Скобло Т. С., Власовец В. М., Науменко А. О., Дудников І. А. Дослідження впливу віброобробки на зміцнення структурних складових сталі *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 158. С. 279–287

12. Іванкова, О., В. Бартош, Я. Общій, Ю. Кисіль. «Відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки пластичним деформуванням». *Modern Engineering and Innovative Technologies*, вип. 1, вип. 25-01, Лютий 2023, с. 23-29, doi:10.30890/2567-5273.2023-25-01-073. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-25-01-073>

Abstract. The task of the technical service industry is to increase the performance of machines and mechanisms.

The development and implementation of high-performance technologies for the restoration of worn machine parts will allow solving this problem. The technology for distributing worn machine parts is one of the productive and affordable. The study of the process of distributing hollow parts includes the study of the stress state of the material of the parts.

Technical service enterprises need to assess residual stresses to develop new and improve technological processes for restoring worn machine parts by plastic deformation.

Clarification of the location (direction) and magnitude of internal stresses in parts that have been deformed is a topical issue. Modern methods for assessing residual stresses in the material of plastically deformed parts are considered. The method for calculating tangential and axial residual stresses, developed by M. M. Davydenko, which is based on cutting rings and cutting strips from the cylindrical samples under study, is analyzed.

Keywords: technical service, plastic deformation, distribution, residual stresses, determination method, calculation.

Стаття відправлена: 25.04.2025 р.

© Іванкова О.В.