

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний технічний університет

МАТЮХІН АНТОН ЮРІЙОВИЧ

УДК 539.3:51.001.2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАСТИЧНОЇ ФОРМОЗМІНИ
ТОВСТОСТІННИХ ПОРОЖНИСТИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ
ГАРМОНІЙНИХ ФУНКЦІЙ

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2016

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор **Чигиринський Валерій Вікторович**, Запорізький національний технічний університет МОН України, завідувач кафедри обробки металів тиском.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Сяський Андрій Олексійович**, Рівненський державний гуманітарний університет МОН України, проф. кафедри «Загальнотехнічних дисциплін, технологій та цивільної безпеки»

доктор фізико-математичних наук, професор **Черняков Юрій Абрамович**, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара МОН України, проф. кафедри «Теоретична та прикладна механіка»

Захист відбудеться «22» листопада 2016 р. о 15³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01 у Запорізькому національному технічному університеті за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Запорізького національного технічного університету за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64 та на сайті університету у вкладці «Наука – Спеціалізована вчена рада».

Автореферат розісланий «___» _____ 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01
доктор технічних наук



О.А. Мітяєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Реальні процеси обробки металів завжди супроводжуються нерівномірністю пластичної формозміни, що впливає на силові і кінематичні параметри, якість готової продукції. Експериментальні і теоретичні дослідження показують, що нерівномірність пластичної формозміни має загальну закономірність як у напруженому, так і в деформованому стані. Основними чинниками, що впливають на появу неоднорідності і характер її розподілу, є фактор форми і коефіцієнт контактного тертя.

Виникає необхідність оцінки процесу пластичної формозміни з позиції нерівномірності пластичної течії. У теорії пластичності це можливо тоді, коли ставиться і розв'язується замкнена задача, тобто розв'язується система диференціальних рівнянь, що враховують як статичні, так і кінематичні умови задачі.

Вважається, що повне рішення системи диференціальних рівнянь теорії пластичності визначає дійсний напружено-деформований стан.

Розробка математичних моделей на базі замкнутої задачі теорії пластичності в умовах вісесиметричної неоднорідної пластичної формозміни, дозволяє отримати дійсний напружено-деформований стан середовища, що є актуальною проблемою.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі обробка металів тиском Запорізького національного технічного університету відповідно з планами державних бюджетних науково-дослідних робіт за 2012 – 2015 роки за темою “Розробка технології виробництва та обладнання для виробів зниженої металоємності в умовах машинобудівного та металургійних виробництв” (шифр – 01512, номер державної реєстрації 0113U002419) та 2015 – 2018 роки за темою: “Моделювання динамічних та статичних задач, нові матеріали, обладнання та технології в обробці металів тиском.” (шифр – 01515, номер державної реєстрації 0115U004904).

Внесок здобувача, як виконавця даних науково-дослідних тем, полягає у розробці математичної моделі вісесиметричного напруженого стану металу при осьовому навантаженні порожнистих тіл обертання в умовах неоднорідної пластичної течії.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка математичної моделі на базі замкненого рішення задачі теорії пластичності, в умовах вісесиметричного навантаження для забезпечення достовірності та надійності результату в умовах неоднорідної пластичної формозміни.

Для досягнення поставленої мети необхідно сформулювати та вирішити такі завдання:

- визначити загальні закономірності зміни напружено-деформованого стану середовища з урахуванням впливу неоднорідності пластичної течії;
- поставити і визначитись зі схемою розв'язання замкненої вісесиметричної задачі теорії пластичності;

- з використанням гармонійних функцій визначити компоненти тензора напружень в циліндричних координатах;
- встановити умови переходу від напружень до швидкостей деформацій;
- з урахуванням умови пластичності і умов переходу за допомогою методу гармонійних функцій визначити компоненти тензора швидкостей деформацій;
- на базі отриманих рішень побудувати математичну модель пластичного середовища;
- знайти та проаналізувати аналітичне рішення прикладної задачі теорії пластичності в циліндричних координатах.

Об'єкт дослідження – процес пластичної формозміни в умовах вісесиметричного неоднорідного напружено–деформованого стану тіл.

Предмет дослідження – неоднорідний напружено-деформований стан тіл в умовах вісесиметричного навантаження.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз напружено-деформованого стану металу базувався на методі гармонійних функцій. Двобічний і односторонній осередки деформації, граничні умови задачі досліджувалися експериментальним шляхом осадки товстостінної кільцевої заготовки на пресі. Для оцінки достовірності отриманих результатів рішення задачі порівнювалися з експериментальними і теоретичними даними інших авторів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. У роботі набув подальшого розвитку метод гармонійних функцій для вісесиметричного напружено – деформованого стану тіл.
2. Вперше отримано і розв'язане узагальнене рівняння рівноваги в циліндричних координатах для визначення дотичних складових тензора напружень при навантаженні порожнистих виробів.
3. Вперше, аналітичним шляхом, визначено компоненти тензора напружень та компоненти тензора швидкостей деформацій для вісесиметричної задачі з використанням гармонійних функцій, побудована математична модель пластичного середовища.
4. Вперше отримано замкнений розв'язок вісесиметричної задачі теорії пластичності в аналітичному вигляді, з використанням гармонійних функцій.
5. Вперше побудовані аналітичні вирази для визначення напружень при різноманітних варіантах пластичної формозміни циліндричних порожнистих виробів в осьовому напрямку, з використанням гармонійних функцій.

Практичне значення одержаних результатів. Робота має теоретико-прикладний характер. Розроблено математичну модель визначення параметрів напружено – деформованого стану в циліндричних координатах, в умовах неоднорідної пластичної формозміни. Отримане замкнуте розв'язання вісесиметричної задачі дозволяє узагальнити результати рішення в напруженнях і деформаціях, забезпечити його достовірність в розрахунках, врахувати багатofакторність процесу, отримати оптимізовані співвідношення технологічних показників. Отримані в роботі результати можуть бути

використані при виготовленні заготовок типу кілець для авіадвигунів в умовах АТ «Мотор Січ» (акт впровадження від 17.04.2015р.).

Теоретичні результати дослідження використані в навчальному процесі при читанні спеціальних курсів теорії пластичності для студентів спеціальності «Обладнання та технології пластичного формування конструкцій машинобудування» (акт впровадження результатів НДР ЗНТУ від 15.10.2015р.).

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення й результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно та опубліковані в роботах [1 –18]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, з питань, що стосуються теми дослідження, здобувачу належать: у роботах [1, 2, 3, 4, 12] – постановка задачі теорії пластичності, визначення та розв’язання узагальненого диференціального рівняння рівноваги в циліндричних координатах та розробка математичної моделі тиску пластичної середовища в радіальному напрямку при деформуванні порожнистих циліндричних тіл при осьовому навантаженні; у роботах [5, 6, 7, 8, 13, 14] отримання замкнутого розв’язання вісесиметричної плоскої задачі теорії пластичності в циліндричних координатах, визначення впливу радіального підпору на зміну характеру і величин напруженого стану, а також визначення граничних умов для розв’язання плоскої задачі теорії пластичності в циліндричних координатах напівзворотнім методом; у роботах [9, 10, 11, 15, 16, 17, 18] – були отриманні експериментальні і теоретичні дані при однобічній течії металу в процесі осаджування кільцевих деталей, а також аналіз факторів, що впливають на появу і поширення неоднорідності пластичного деформування. Співавтору професору Чигиринському В.В. належить формування напрямку дослідження дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні етапи і результати досліджень за темою дисертації доповідались та обговорювались на: щорічних науково-практичних конференціях викладачів, науковців, аспірантів та студентів Запорізького національного технічного університету «Тиждень науки» (Запоріжжя, 2012 - 2015); щорічних наукових семінарах кафедри «Обробка металів тиском» Запорізького національного технічного університету (Запоріжжя, 2011 - 2015); XI міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка і технологія 2010» (Київ, травень 2010); міжнародній науково-технічній конференції «Инновационные технологии обработки металлов давлением» (Москва, жовтень 2011); IX міжнародній науково-технічній конференції «Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок» (Запоріжжя-Алушта, вересень 2012); II міжнародній науково-технічній конференції «Машины і пластична деформація металів» (Запоріжжя, листопад 2012); V міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ, травень 2014); XV міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Київ, червень 2014); XVI International Scientific Conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering

(Czestochowa, Poland, 26-29 травень 2015); III міжнародній науково-технічній конференції «Машини і пластична деформація металів» (Запоріжжя, жовтень 2015).

Публікації. Основні результати дисертації відображені у 18 опублікованих роботах: з них 7 статей опубліковано у фахових виданнях МОН України, 3 статті у закордонних виданнях, 6 тез доповідей на конференціях міжнародного та національного рівня та 2 додаткові публікації.

Структура дисертації. Дисертаційна робота загальним об'ємом 176 сторінки машинописного тексту складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 146 найменувань на 17 сторінках, 3 додатки з актами впровадження на 4 сторінках і включає 55 рисунки та 3 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертаційної роботи подано загальну характеристику роботи: обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету і задачі дослідження, визначаються об'єкт, предмет та методи досліджень; охарактеризовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; надано інформацію про апробацію роботи та її зв'язок з науково-дослідними темами; зазначено кількість публікацій за темою дисертації, а також особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві; стисло наводиться структура та об'єм дисертації.

У **першому розділі** на основі досліджень вітчизняних та закордонних опублікованих джерел подано аналітичний огляд сучасного стану проблеми за темою дисертації. Відзначено, що реальні процеси формозміни завжди супроводжуються неоднорідністю пластичної формозміни. В свою чергу, неоднорідність пластичної формозміни, має однакові закономірності зміни, як для напруженого, так і деформованого станів. З наведених експериментальних даних видно, що між нерівномірністю напруженого і деформованого станів має місце відповідність. Так, при різних процесах пластичної формозміни високих заготовок, контактні напруження і деформації розподілені рівномірно по довжині осередку деформації. По висоті, при тих же факторах форми розподіл напружень і деформацій відрізняється найбільшою нерівномірністю. При пластичній формозміні низьких деталей, максимальна нерівномірність напружено-деформованого стану спостерігається по довжині осередку деформації, і мінімальна по висоті. Це свідчить про те, що при розгляді задач теорії пластичності, для достовірності отриманого результату, у вирішенні необхідно враховувати одночасно, як зміну напруженого, так і деформованого стану пластичної середовища, тобто ставити та розв'язувати замкнену задачу теорії пластичності. Під замкненим розв'язанням розуміється, отримання такого рішення, яке одночасно задовольняє, як статичні умови задачі (в напруженнях), так і кінематичні (в деформаціях).

Розв'язанням задач теорії пластичності та пружності займалися наступні вчені: Алієв І.С., Воронцов А.Л., Гун Г.Я., Евстратов В.О., Ільющин А.А., Колмагоров В.А., Качанов Л.М., Кухарь В.Д., Малинин Н.Н., Охрименко Я.М., Пожуєв В.И., Попов Е.А., Соколовський В.В., Смирнов В.С., Сторожев М.В., Титов В.М., Тарновський І.Я., Унксов Е.П., Чигиринський В.В., Черняков Ю.А., Шнейберг А.М., Шамровський А.Д., Prandtl L., Nadai A.

Прикладами замкненої постановки і розв'язання задачі прикладної теорії пластичності є метод ліній ковзання. Диференціальні рівняння, що визначають напруження та швидкості деформації, можна віднести до однакового типу диференціальних рівнянь. Розв'язання задачі з використанням методу ліній ковзання можна було б вважати замкненим, якщо було відомо їх положення в деформованому просторі.

Іншим прикладом замкненого розв'язання є рішення варіаційної задачі в теорії пластичності. Варіаційна задача в прикладній теорії пластичності по постановці і вирішенню є різною. В основному вирішується задача, що задовольняє енергетичній умові рівноваги. Варіювання повної роботи (функціоналу) реалізується за переміщенням. Якщо варіювання відбувається по напруженням, то задача еквівалентна енергетичній умові нерозривності деформацій, або кінематичній умові задачі. Варіювання за напруженням і деформаціям одночасно визначає розв'язання замкненої задачі теорії пластичності.

Мається на увазі, що визначені поля напружень і деформацій. Ці поля знаходяться у відповідності один з одним, через фізичні рівняння зв'язку, задоволені граничні умови по напруженням і деформаціям. Отже, розв'язання є замкнутим у відповідності з повною постановкою задачі (кількість рівнянь відповідає кількості невідомих).

Ще одним з варіантів замкненого розв'язання теорії пластичності є рішення з використанням гармонійних функцій. Таким чином, замкнена задача в теорії пластичності відома, виникає нагальна необхідність її розв'язання.

У другому розділі розглянуто вирішення задач теорії пластичності з використанням гармонійних функцій в декартових координатах, а також наводяться основи експериментальних досліджень за темою дисертації.

В постановці задачі записана система рівнянь теорії пластичності для плоскої задачі, що включає в себе як статичні, так і кінематичні умови. Граничні умови задані в напруженнях та швидкостях деформацій. Розв'язання задачі наведено в довільній системі координат x, y , що унеможлиблює вирішення замкненої вісесиметричної задачі теорії пластичності у циліндричних координатах. Представляє науковий інтерес розробки нового підходу розв'язання вісесиметричної задачі теорії пластичності в замкненому вигляді з урахуванням нерівномірності пластичної формозміни методом гармонійних функцій.

У третьому розділі з точки зору неоднорідності напружено-деформованого стану поставлена вісесиметрична задача теорії пластичності в замкненому вигляді. Розглядається система рівнянь теорії пластичності для вісесиметричної

задачі. Постановка задачі включає в себе рівняння, що враховують як статичні, так і кінематичні параметри процесу пластичної формозміни:

1. Диференціальні рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_z}{\rho} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0. \quad (1)$$

2. Умова пластичності:

$$(\sigma_\rho - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\rho z}^2 = 4k^2. \quad (2)$$

3. Фізичне рівняння зв'язку напружень та швидкостей деформацій:

$$\frac{\sigma_\rho - \sigma_z}{2\tau_{\rho z}} = \frac{\dot{\xi}_\rho - \dot{\xi}_z}{\dot{\gamma}_{\rho z}}. \quad (3)$$

4. Умова нестисливості:

$$\dot{\xi}_\rho + \dot{\xi}_z = 0. \quad (4)$$

5. Рівняння нерозривності швидкостей деформацій:

$$\frac{\partial^2 \dot{\xi}_\rho}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{\xi}_z}{\partial \rho^2} = \frac{\partial^2 \dot{\gamma}_{\rho z}}{\partial z \partial \rho}. \quad (5)$$

6. Граничні умови в напруженнях та деформаціях:

$$\begin{aligned} \tau_n &= -k \cdot \sin(\mathbf{A}\Phi - 2\alpha) \\ \dot{\gamma}_n &= \beta \cdot \sin(\mathbf{B}\Phi - 2\alpha), \end{aligned} \quad (6)$$

де σ , τ - нормальні та дотичні напруження; τ_n - контактне дотичне напруження; $\dot{\gamma}_n$ - швидкість деформації зсуву на контакті; α - кут нахилу площадки; k - опір пластичному зсуву; Φ - функція координат осередку деформування, котра підлягає визначенню; \mathbf{A} - стала величина.

Використовуючи диференціальні рівняння рівноваги та умови пластичності отримаємо диференціальне рівняння у котрому в якості невідомої буде лише дотичне напруження (узагальнене рівняння рівноваги).

$$\frac{\partial^2 \tau_{\rho z}}{\partial \rho^2} - \frac{\partial^2 \tau_{\rho z}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial z \partial \rho} \left(\pm 2\sqrt{k^2 - \tau_{\rho z}^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{\tau_{\rho z}}{\rho} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\pm \frac{1}{\rho} \sqrt{k^2 - \tau_{\rho z}^2} \right) = 0. \quad (7)$$

Вперше отримане диференціальне рівняння рівноваги в циліндричних координатах (7), яке є нелінійним диференціальним рівнянням в частинних похідних другого порядку гіперболічного типу. Аналітичне розв'язання даного рівняння дозволяє знайти функціональну залежність дотичного напруження від координат осередку деформації і при підстановці в рівняння рівноваги, визначити нормальні складові тензора напружень.

Рівняння (7) одержано вперше та було використано для вивчення напруженого стану при осаді порожнистих тіл обертання. Це рівняння є нелінійним, що вносить труднощі знаходження аналітичного розв'язку. Співвідношення (3)-(5) використовуються при розв'язанні деформаційної задачі.

У четвертому розділі будується розв'язок узагальненого рівняння рівноваги (7), аналітичне визначення дотичних та нормальних складових тензора

напружень, розв'язання кінематичної задачі та розробка математичної моделі пластичного середовища в умовах вісесиметричного напруженого стану.

З метою лінеаризації рівняння (7), використовується тригонометрична підстановка наступного типу: $\tau_{\rho z} = k \cdot \sin A\Phi$. Така залежність задовольняє граничні умови. Після позбавлення від нелінійності в рішенні можна використовувати фундаментальну підстановку наступного типу, приймаючи при цьому супротив деформації зсуву змінною величиною: $k = H_{\sigma} \exp \theta$

В результаті підстановки добутку функцій, після перетворень та спрощень, отримаємо узагальнене рівняння рівноваги в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} & \{(H_{\sigma})_{\rho\rho} - (H_{\sigma})_{zz} + 2(H_{\sigma})_{\rho}(\theta_{\rho} + A\Phi_z) + (H_{\sigma})_{\rho} \frac{1}{\rho} - 2(H_{\sigma})_z(\theta_z - A\Phi_{\rho}) + \\ & + H_{\sigma} \left[(\theta_{\rho\rho} - \theta_{zz}) + (\theta_{\rho} + A\Phi_z)^2 - (\theta_z - A\Phi_{\rho})^2 + \frac{1}{\rho}(\theta_{\rho} + A\Phi_z) + 2A\Phi_{\rho z} - \frac{1}{\rho^2} \right] \} \cdot \sin A\Phi + \\ & + \{2(H_{\sigma})_{\rho}(A\Phi_{\rho} - \theta_z) - 2(H_{\sigma})_z(A\Phi_z - \theta_{\rho}) - (H_{\sigma})_z \frac{1}{\rho} + H_{\sigma}[2(A\Phi_{\rho} - \theta_z) \cdot \\ & \cdot \left(\theta_{\rho} + A\Phi_z + \frac{1}{2\rho} \right) + A\Phi_{\rho\rho} - A\Phi_{zz} - 2\theta_{\rho z}] - 2(H_{\sigma})_{\rho z} \} \cdot \cos A\Phi = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Дане рівняння згруповано таким чином, що з'являються оператори при синусах та при косинусах. В дужках згруповані похідні від невідомих функцій. При цьому з'являється нелінійність, що визначається цими дужками. Для спрощення рішення, необхідно позбавитись від нелінійності прирівнюючи вказані дужки нулю.

Після спрощення (8), отримаємо рівняння для визначення дотичного напруження, котре задовольняє диференціальному рівнянню (7):

$$\tau_{\rho z} = H_{\sigma} \exp \theta \cdot \sin A\Phi. \quad (9)$$

Підставляючи знайдене дотичне напруження у раніше отримане диференціальне рівняння та інтегруючи їх маємо формули для визначення нормальних напружень:

$$\sigma_{\rho} = -H_{\sigma} \exp \theta \cdot \cos A\Phi + C \quad (10)$$

$$\sigma_z = -3H_{\sigma} \exp \theta \cdot \cos A\Phi + C, \quad (11)$$

при умові виконання наступних залежностей: $\theta_{\rho} = -A\Phi_z$; $\theta_z = A\Phi_{\rho}$; $\theta_{\rho\rho} + \theta_{zz} = 0$; $A\Phi_{\rho\rho} + A\Phi_{zz} = 0$.

З урахуванням співвідношень Коші-Рімана можна показати, що функції θ та $A\Phi$ задовольняють рівнянням Лапласа і є гармонійними.

В цьому розділі розглядається визначення кінематичних параметрів вісесиметричної задачі теорії пластичності, а саме визначаються компоненти тензора швидкостей деформацій.

Знаючи компоненти тензора напружень, через рівняння зв'язку, вирішується задача в швидкостях деформацій, при цьому функція Φ переходить з полів напружень в поля швидкостей деформацій. Таким чином, вдається зв'язати зсувні швидкості з лінійними швидкостями деформацій.

Підставляючи зазначені вирази в рівняння нерозривності швидкостей деформацій, отримуємо наступне рівняння:

$$\frac{\partial^2 \xi_\rho}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \xi_\rho}{\partial \rho^2} = \pm 2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial z \partial \rho} \xi_\rho \cdot \operatorname{tg} \mathbf{B}\Phi \quad (12)$$

Це диференціальне рівняння в частинних похідних другого порядку гіперболічного типу, в якому розподільчою функцією є лінійна швидкість ξ_ρ . З цього слідує, що ті підходи які були застосовані при вирішенні диференціального рівняння рівноваги, можуть бути використані і при розв'язанні рівняння нерозривності швидкостей деформацій.

Підставляючи, отримуємо диференціальне рівняння нерозривності швидкостей деформацій в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} & \left\{ \dot{I}_\xi \cdot \left[-\theta'_{\rho\rho} - (\theta'_\rho + \mathbf{B}\Phi_z)^2 + \theta'_{zz} + (\theta'_z - \mathbf{B}\Phi_\rho)^2 \right] - (H_\xi)_{\rho\rho} - \right. \\ & - 2 \cdot (\dot{I}_\xi)_\rho \cdot (\theta'_\rho + \mathbf{B}\Phi_z) + (H_\xi)_{zz} + 2 \cdot (H_\xi)_z \cdot (\theta'_z - \mathbf{B}\Phi_\rho) \left. \right\} \cdot \cos \mathbf{B}\Phi + \\ & + \left\{ 2 \cdot H_\xi \cdot (\mathbf{B}\Phi_\rho - \theta'_z) \cdot (\theta'_\rho + \mathbf{B}\Phi_z) - 2 \cdot (H_\xi)_z \cdot (\mathbf{B}\Phi_z + \theta'_\rho) + \right. \\ & + 2 \cdot (H_\xi)_\rho \cdot (\mathbf{B}\Phi_\rho - \theta'_z) + H_\xi \cdot (\mathbf{B}\Phi_{\rho\rho} - \mathbf{B}\Phi_{zz}) \left. \right\} \cdot \sin \mathbf{B}\Phi = \\ & = 2 \cdot H_\xi \cdot \mathbf{B}\Phi_{\rho z} \cdot \cos \mathbf{B}\Phi + \left[2 \cdot (H_\xi)_{\rho z} + 2 \cdot H_\xi \cdot \theta'_{\rho z} \right] \cdot \sin \mathbf{B}\Phi. \end{aligned} \quad (13)$$

З'являються аналогічні дужки в операторах тригонометричних функцій. Розв'язання рівняння (13) можна записати наступним чином:

$$\xi_\rho = H_\xi \cdot \exp \theta' \cdot \operatorname{Cos} \mathbf{B}\Phi ; \quad -\xi_z = H_\xi \cdot \exp \theta' \cdot \operatorname{Cos} \mathbf{B}\Phi \quad (14)$$

$$\dot{\gamma}_{\rho z} = 2 \cdot H_\xi \cdot \exp \theta' \cdot \operatorname{Sin} \mathbf{B}\Phi, \quad (15)$$

при виконанні наступних обмежень на функції: $\theta'_\rho = -\mathbf{B}\Phi_z$, $\theta'_z = \mathbf{B}\Phi_\rho$, $\theta'_{\rho\rho} + \theta'_{zz} = 0$; $\mathbf{B}\Phi_{\rho\rho} + \mathbf{B}\Phi_{zz} = 0$.

Таким чином, замкнене розв'язання плоскої вісесиметричної задачі теорії пластичності вказує на те, що поля напружень та поля швидкостей деформацій можуть бути описані однаковими блоками координатних гармонійних функцій, що дозволило пов'язати інтегральні характеристики напруженого та деформованого стану між собою.

В цьому ж розділі приводиться математична модель пластичного середовища в умовах вісесиметричного напруженого стану наступного виду:

$$T_i = \chi(H_i)^{m_1} \cdot (G_i)^{m_2} \cdot (T)^{m_3} \cdot \exp \theta_4 \cdot \exp \theta_5 \quad (16)$$

Значення інтенсивності швидкостей деформацій зсуву H_i , інтенсивності деформації зсуву G_i та температури середовища T , що входять у вираз (16), є

змінними величинами і приймаються для кожної точки осередку деформації. Згідно з даними Андреюка Л.В., Тюленєва Г.П., існують аналогічні моделі отримані на підставі експериментальних досліджень в умовах однорідного напруженого і деформованого станів. Дана модель дозволяє визначити межу текучості для шістдесяти шести марок сталі в залежності від таких параметрів пластичного деформування як: швидкість деформації U , ступеня деформації ε і температури T_0 . Модель пластичної середовища Андреюка Л.В., Тюленєва Г.П. має вигляд:

$$\sigma_T = S \cdot \sigma_0 \cdot U^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot \left(\frac{T_0}{1000} \right)^c \quad (17)$$

Ставиться більш складна задача, що враховує не тільки швидкість деформації, але й деформаційні та температурні умови. Модель пластичного середовища (16) підтверджується експериментальними даними Андреюка Л.В., Тюленєва Г.П.

Використовуючи (16) і вираз (17) як своєрідне граничну умову, можна отримати розподіл межі текучості по об'єму осередку деформації в залежності від розподілу швидкості деформації, ступеня деформації та температури.

У п'ятому розділі наводиться розв'язання прикладної задачі теорії пластичності для тіл обертання з використанням гармонійних функцій. Розглядається пластичне деформування товстостінної круглої порожнистої заготовки в осьовому напрямку. Схема пластичної формозміни представлена на рис. 1.

Використовуються раніш отримані вирази для знаходження нормальних та дотичних компонентів тензора напружень (9) - (11). Запишемо граничні умови виходячи з схеми процесу осаджування:

1. При $\rho = r$, $z = \frac{h}{2}$, $\theta = \theta_0$, $A\Phi = A\Phi_0$, $\sigma_\rho - \sigma_z = 2k_0 + \sigma_0 = 2k_0\xi_0$; $\xi_0 = 1 + \frac{\sigma_0}{2k_0}$.
2. При $\rho = R$, $z = \frac{h}{2}$, $\theta = \theta_1$, $A\Phi = A\Phi_1$, $\sigma_z - \sigma_\rho = 2k_1 + \sigma_1 = 2k_1\xi_1$; $\xi_1 = 1 + \frac{\sigma_1}{2k_1}$.

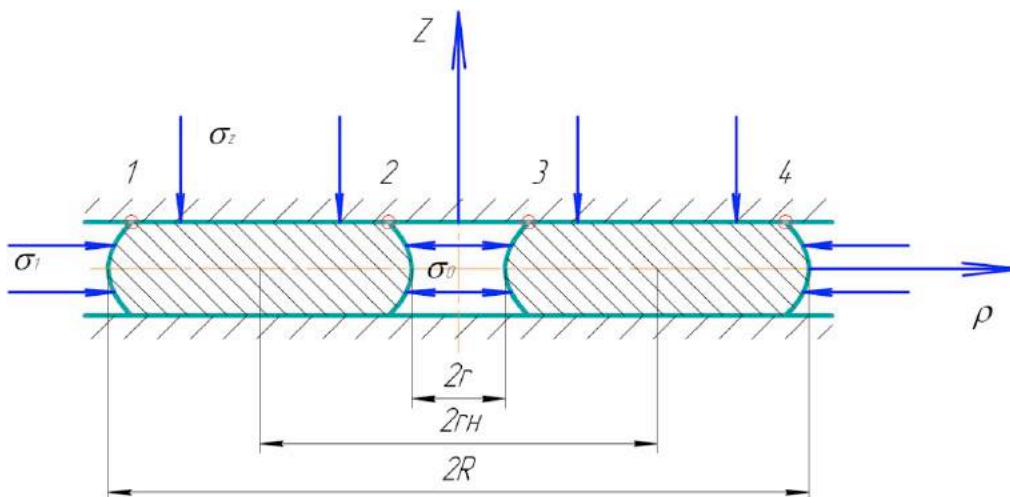


Рисунок 1 – Схема пластичного деформування.

При підстановці граничних умов маємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} 2k_0\xi_0 &= 2\left(C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r}\right) \cdot \exp\theta_0 \cdot \cos A\Phi_0; \\ 2k_1\xi_1 &= 2\left(C_1 \cdot R + \frac{C_2}{R}\right) \cdot \exp\theta_1 \cdot \cos A\Phi_1, \end{aligned} \quad (18)$$

де ξ_0 та ξ_1 значення які визначають величину підпору на зовнішньому та внутрішньому діаметрах.

Вирішуючи систему відносно C_1 та C_2 , маємо:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{R^2 - r^2} \left[R \frac{k_1 \cdot \xi_1}{\exp(\theta_1) \cdot \cos A\Phi_1} - r \frac{k_0 \cdot \xi_0}{\exp(\theta_0) \cdot \cos A\Phi_0} \right]; \\ C_2 &= \frac{R \cdot r}{R^2 - r^2} \left[R \frac{k_0 \cdot \xi_0}{\exp(\theta_0) \cdot \cos A\Phi_0} - r \frac{k_1 \cdot \xi_1}{\exp(\theta_1) \cdot \cos A\Phi_1} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Таким чином вирази для визначення нормальних та дотичних напружень приймають наступний вид:

$$\sigma_\rho = - \left[\frac{R \cdot k_1 \cdot \xi_1 \cdot \left(\rho - \frac{r^2}{\rho}\right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_1} \cdot \exp(\theta - \theta_1) - \frac{r \cdot k_0 \cdot \xi_0 \cdot \left(\rho - \frac{R^2}{\rho}\right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_0} \cdot \exp(\theta - \theta_0) \right] \cdot \cos A\Phi + k_0 \quad (20)$$

$$\sigma_z = -3 \left[\frac{R \cdot k_1 \cdot \xi_1 \cdot \left(\rho - \frac{r^2}{\rho}\right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_1} \cdot \exp(\theta - \theta_1) - \frac{r \cdot k_0 \cdot \xi_0 \cdot \left(\rho - \frac{R^2}{\rho}\right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_0} \cdot \exp(\theta - \theta_0) \right] \cdot \cos A\Phi + k_0 \quad (21)$$

$$\tau_{\rho z} = \left[\frac{R \cdot k_1 \cdot \xi_1 \cdot \left(\rho - \frac{r^2}{\rho}\right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_1} \cdot \exp(\theta - \theta_1) - \frac{r \cdot k_0 \cdot \xi_0 \cdot \left(\rho - \frac{R^2}{\rho}\right)}{(R^2 - r^2) \cdot \cos A\Phi_0} \cdot \exp(\theta - \theta_1) \right] \cdot \sin A\Phi. \quad (22)$$

Розв'язуючи рівняння Лапласа, з урахуванням граничних та очевидних умов в зоні пластичного деформування отримаємо функції θ та $A\Phi$, які зв'язані співвідношенням Коші - Рімана у вигляді:

$$A\Phi = AA_1 z + AA_6 \cdot \rho \cdot z = -AA_6 \cdot z \cdot (\rho - r_n). \quad (23)$$

$$\theta = AA_6 \cdot \frac{\rho^2}{2} - AA_6 \cdot r_n \cdot \rho - AA_6 \cdot \frac{z^2}{2}, \quad (24)$$

де A_6 - постійна величина, котра задається умовами тертя на контактї; r_n - радіус, який визначає положення нейтрального перерізу.

Вирази (20) - (22) визначають нормальні та дотичні напруження не тільки на контактї, але і в кожній точці осередку деформації.

За формулами (20) - (22) побудовані графіки розподілу нормальних та дотичних напружень на контактї по довжині осередку деформації в залежності від основних технологічних факторів, що викликають неоднорідність пластичної формозміни, таких як, коефіцієнт тертя і фактор форми (рис. 2-3):

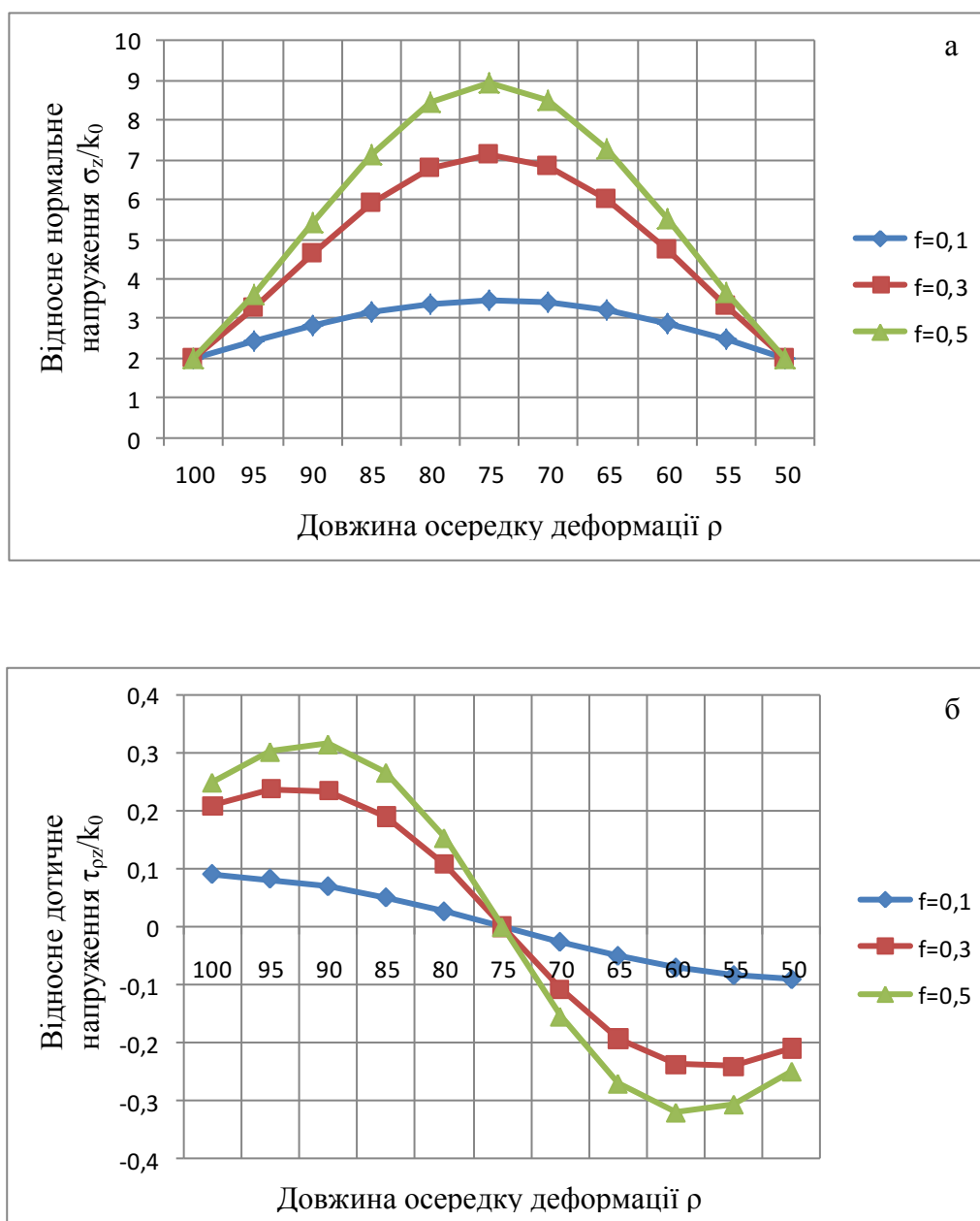


Рисунок 2 - Розподіл відносних нормального (а) та дотичного (б) напружень при факторі форми $l/h=5$ в залежності від коефіцієнту тертя.

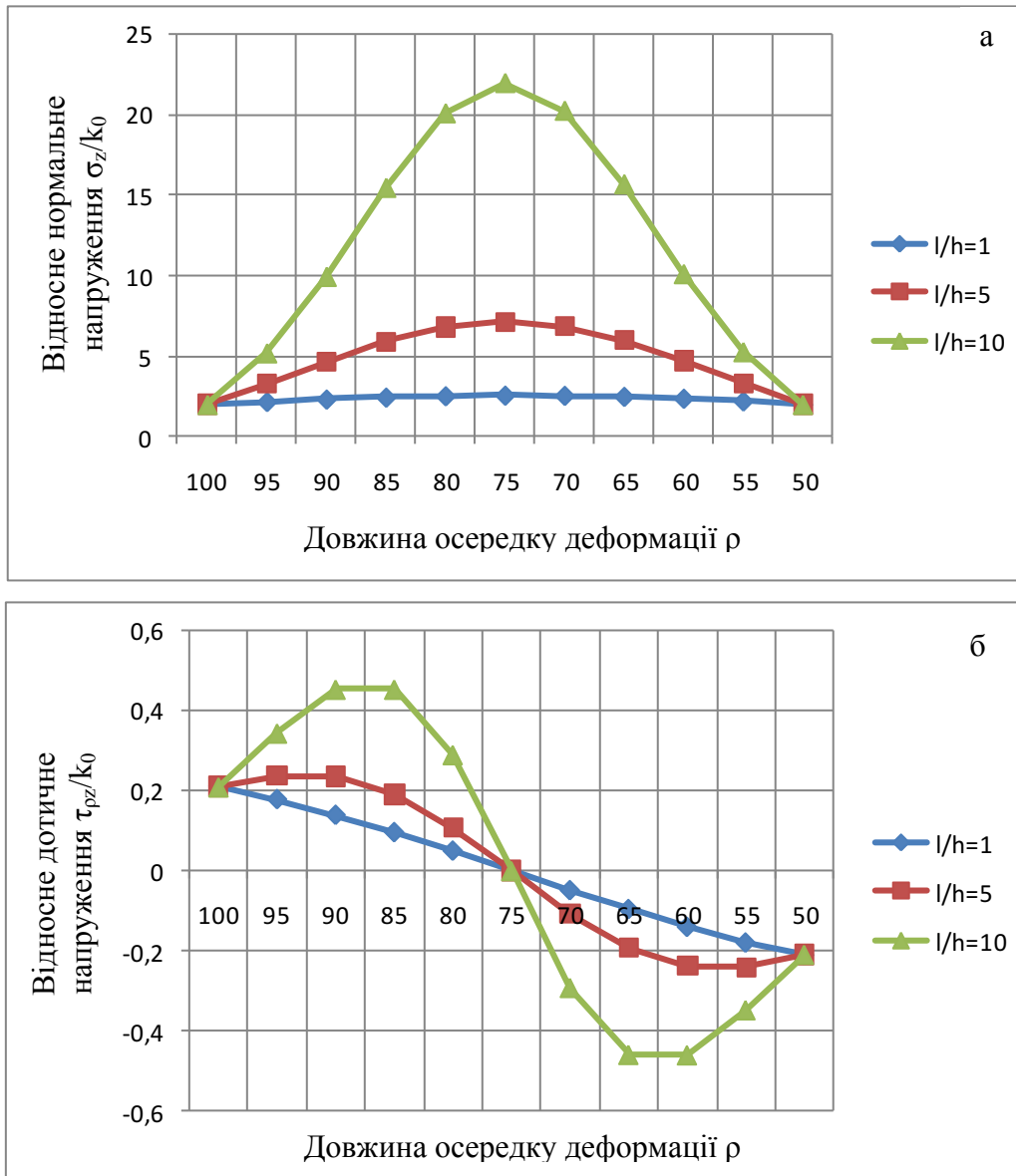


Рисунок 3 – Розподіл відносних нормального (а) та дотичного (б) напружень при коефіцієнті тертя $f=0,3$ в залежності від фактору форми.

Аналізуючи вище наведені графіки, можна зробити висновок про те, що зі збільшенням фактору форми та коефіцієнта контактного тертя, збільшиться значення відносних контактних напружень, що має місце в реальних процесах при симетричному навантаженні. Отже, запропоноване замкнуте рішення задачі теорії пластичності реагує на зміну фактору форми та коефіцієнту тертя. Епюри напруг якісно і кількісно збігаються з даними Сторожева М.В., Попова Е.А. Значення нормальних напружень змінюється за косинусоїдальним законом, а дотичних – за синусоїдальним. Однак, особливістю представленого рішення є те, що дотичне напруження в нейтральному перерізі на контакті дорівнює нулю, що відсутнє у рішеннях вище зазначених авторів, де позначено розрив згідно Амонтона та Зібелю. Крім того існує можливість визначення напруженого стану не тільки на контакті, але і в середині осередку деформації. Вирази (20) - (22)

вказують, що в загальному випадку, розподіл напружень носить асиметричний характер. Це наглядно представлено на рис. 4.

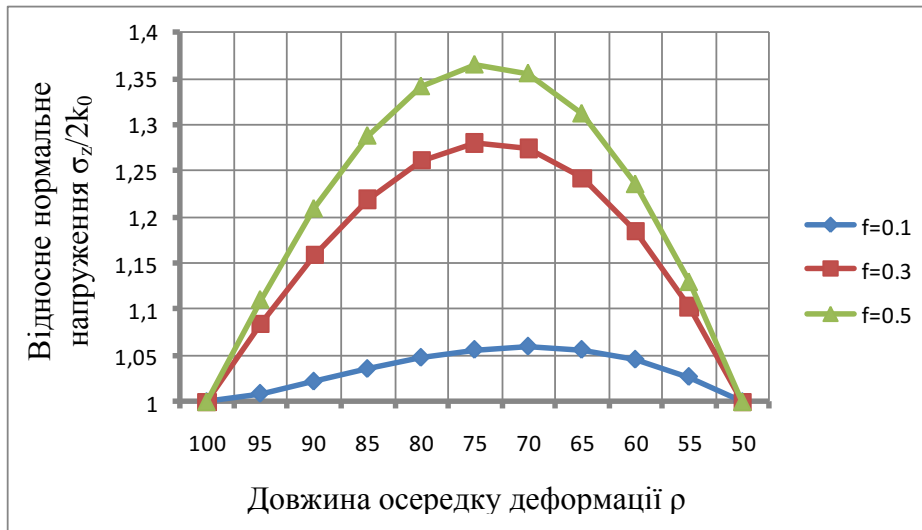


Рисунок 4 – Розподіл відносного нормального напруження при факторі форми $l/h=1$ та коефіцієнті тертя $f=0,1; 0,3; 0,5$.

Пік епюри зміщується в бік меншого діаметру при коефіцієнті тертя 0,1, а при коефіцієнті тертя 0,3 та 0,5 пік епюри зміщується в бік середнього радіуса. Зі збільшенням фактору форми і коефіцієнта тертя максимальні нормальні напруження і зона переходу дотичних напружень зміщується до середнього радіуса.

Розглянемо вплив зовнішнього радіального підпору ξ_1 та ξ_0 на величину і зміщення нейтрального радіусу. Розподіл і величина контактних напружень визначається нейтральним радіусом r_n , зовнішнім підпором ξ_1, ξ_0 , фактором форми l/h та коефіцієнтом тертя f . Значення r_n входить у вирази компонентів тензора напружень (20) - (22). Зі зміною r_n , змінюються значення, що входять в квадратні дужки вище зазначених формул, та аргументи тригонометричних функцій. Визначальним фактором тут є тригонометрична функція, що лінійно залежна від нейтрального радіусу. Перехід дотичного напруження через нуль визначає положення нейтрального радіусу на деформованій стінці порожнистого циліндра. Нормальна напруга в цій зоні приймає максимальне значення.

Вплив зовнішнього радіального підпору ξ_1 та ξ_0 на контактні напруги представлені на рис. 5 - 6. На рис.5 показано розподіл контактних напружень залежно від радіального підпору ξ_1 з боку зовнішнього діаметра. Із збільшенням підпору збільшується значення нормального напруження з боку зовнішнього діаметра з поступовим загасанням до протилежної сторони.

Для симетричного навантаження $\xi_0 = \xi_1 = 1$, крива нормальних напружень практично симетрична, а крива дотичних проходить через нуль у зоні середнього радіусу. Розподіл напруг змінюється зі збільшенням ξ_1 . Пік епюри контактних нормальних напружень зміщується в бік зовнішнього діаметра, точка переходу

дотичних напружень також зміщується в цьому ж напрямку. Форма кривої дотичних напружень у зонах протилежних знаків різна. При зміщенні зони переходу до більшого діаметру крива напруги в даній зоні зменшує свою кривизну. На ділянці більшої довжини позначається пік кривої, який слідом за зоною переходу поступово зміщується в бік зовнішньої зони.

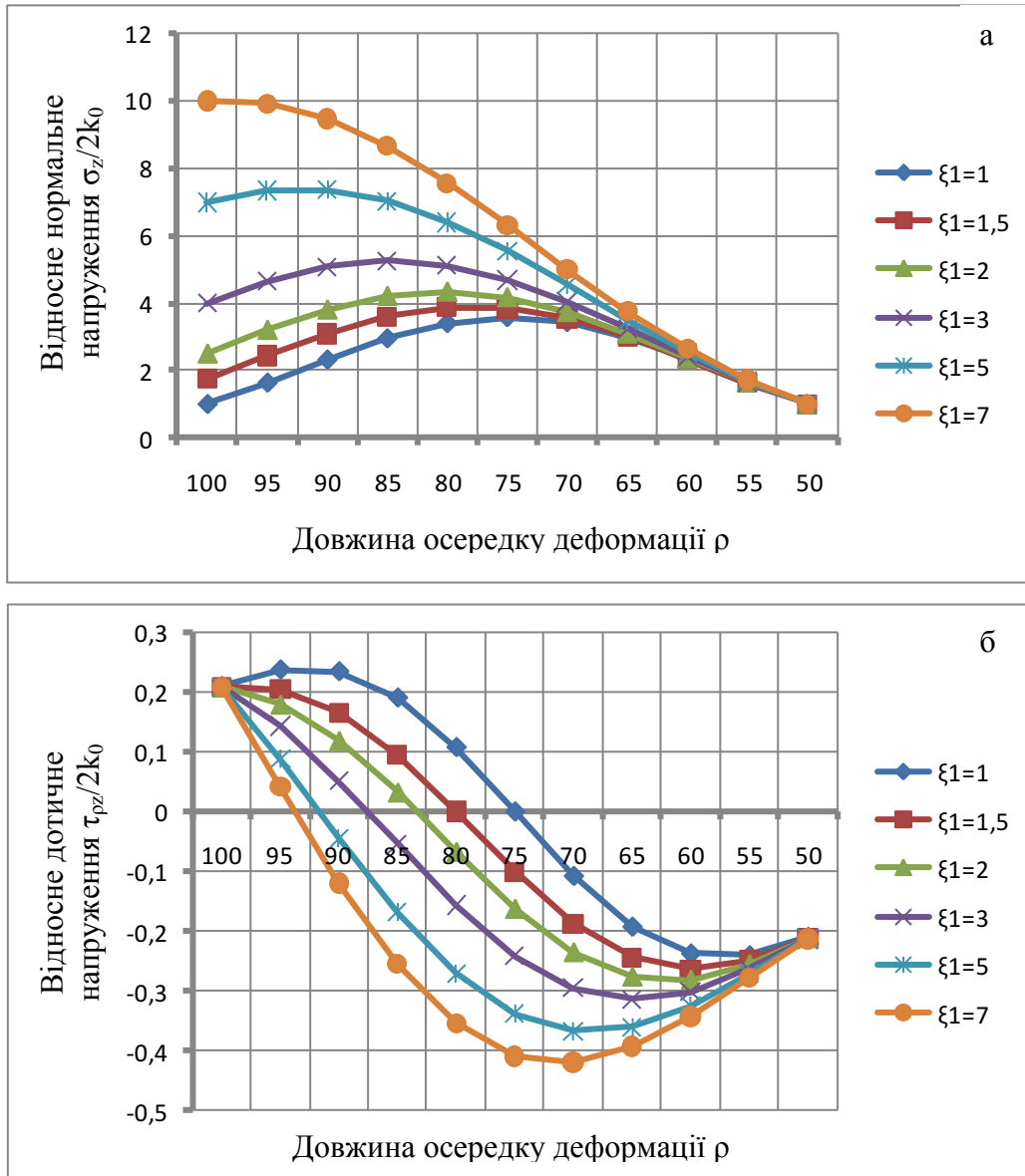


Рисунок 5 - Розподіл відносних нормального (а) та дотичного (б) напружень при факторі форми $l/h = 5$ та коефіцієнті тертя $f=0,3$; $\xi_1=1 \dots 7$; $\xi_0=1$.

Аналогічний характер розподілу кривих спостерігається при дії підпору ξ_0 з боку внутрішнього діаметра, (див. рис. 6).

У підсумку слід зазначити, що запропоновані рішення дозволяють якісно і кількісно змінити напружений стан деформованого полого циліндричного тіла з урахуванням основних параметрів процесу, включаючи вплив зовнішнього підпору.

Змінюючи підпір, змінюється і розподіл контактних напружень і напружень всього осередку деформації.

Як видно з графіків, на величину і характер розподілу нормальних і дотичних напружень, крім коефіцієнта тертя і фактора форми, також впливає значення бічного внутрішнього і зовнішнього підпору ξ_1 та ξ_0 . Під коефіцієнтом бокового підпору слід розуміти вплив інструмента на внутрішню і зовнішню поверхню деформованого зразка, або ж вплив сполучуваних елементів конструкції деталі при складній об'ємній деформації.

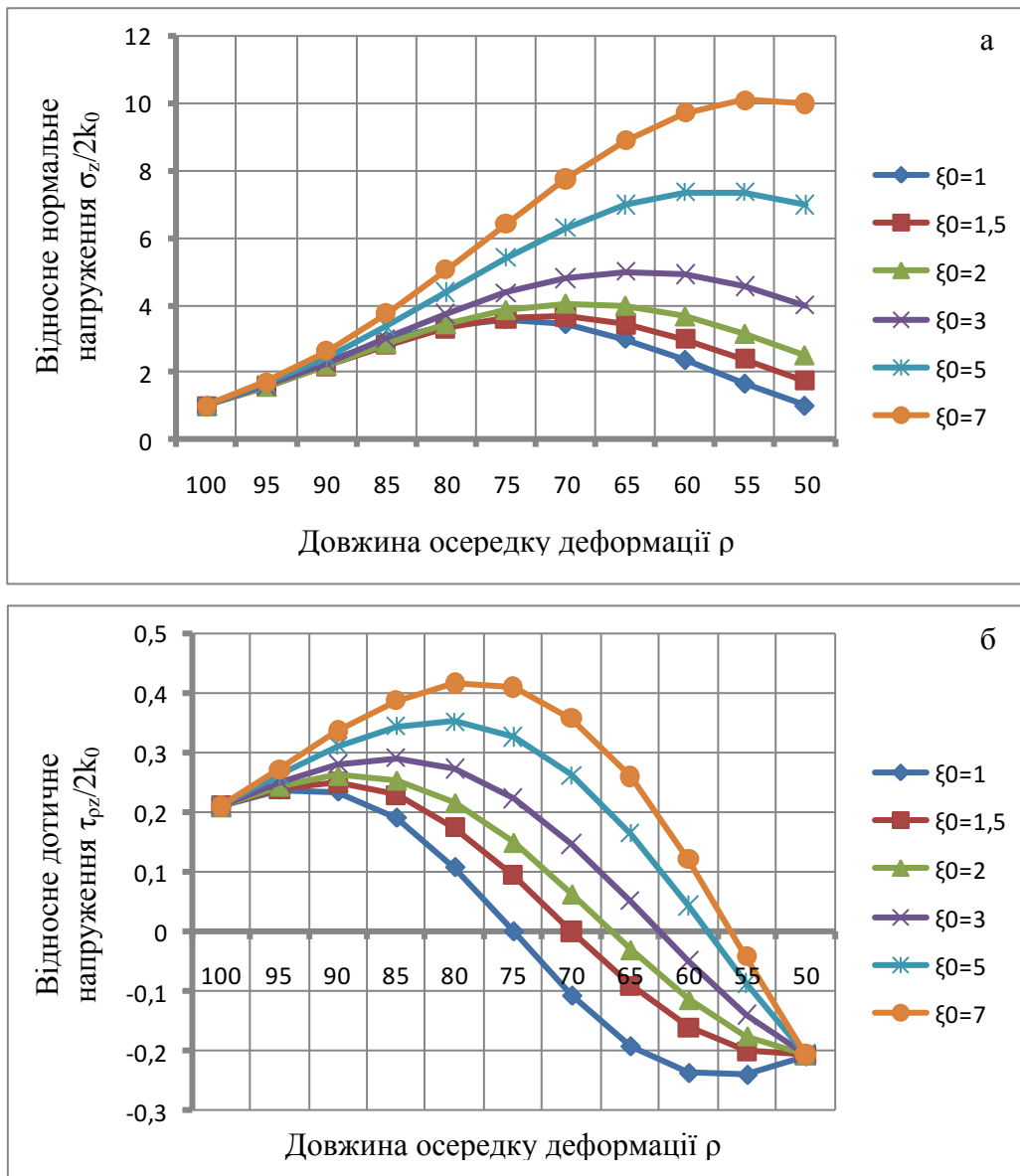


Рисунок 6 – Розподіл відносних нормального (а) та дотичного (б) напружень при факторі форми $l/h = 5$ та коефіцієнті тертя $f=0,3$; $\xi_1=1$; $\xi_0=1 \dots 7$.

Так, при збільшенні внутрішнього підпору і відсутності зовнішнього, течія металу відбувається в зовнішню сторону, тим самим зміщуючи положення нейтрального радіусу в бік меншого діаметра, при цьому, нормальні напруження переходять від симетричного до асиметричного епюрі. Та ж сама тенденція для

зовнішнього підпору. В цьому ж розділі, наводяться вирази для визначення положення радіуса нейтральної поверхні, тобто радіуса відносного якого відбувається розподіл течії металу в напрямку зовнішньої або внутрішньої бічної поверхні, та його вплив на напружено-деформований стан.

Для оцінки отриманого теоретичного результату був проведений лабораторний експеримент по вивченню зовнішнього впливу інструмента на бічну поверхню деформованого зразка, зміщення радіуса нейтральної поверхні, а також течії металу для двозонного і однозонного осередку деформацій.

Методика проведення лабораторного експерименту представлена у розділі 2. Результати експерименту наведені на рис.7 - 10.

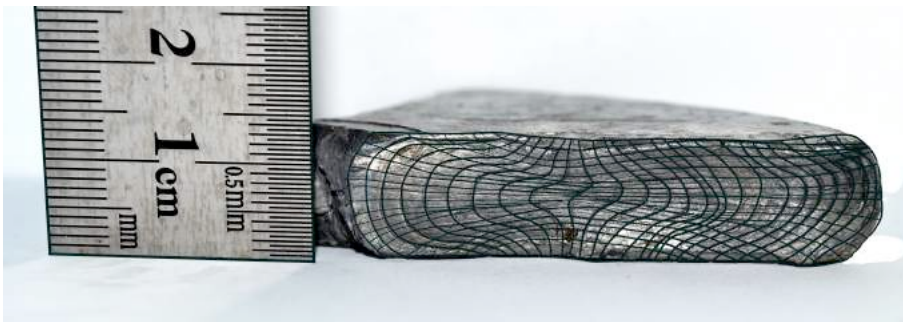


Рисунок 7 – Вільне осаджування між двома шорсткими плоскими плитами.

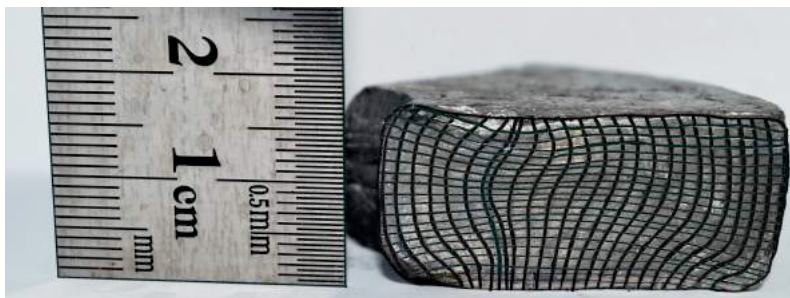


Рисунок 8 – Осаджування з частковим обмеженням течії металу по внутрішній бічній поверхні.

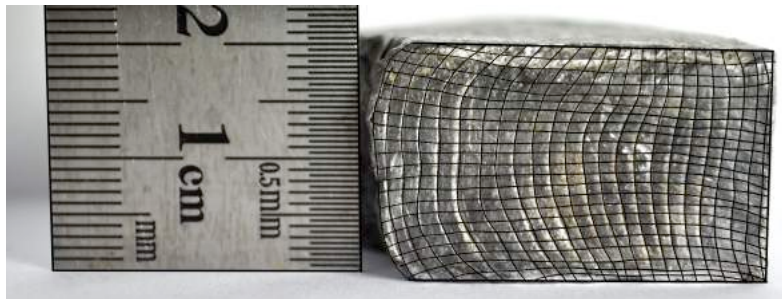


Рисунок 9 – Осаджування з повним обмеженням течії металу по внутрішній бічній поверхні.



Рисунок 10 - Осаджування з повним обмеженням течії металу по зовнішній бічній поверхні.

При вільному осаджуванні між двома шорсткими плитами (див. рис. 7) має місце двозонний осередок деформації, коли стінки порожнистого циліндричного виробу розтікаються відносно радіусу нейтрального перерізу, тим самим збільшуючи зовнішній діаметр і зменшуючи внутрішній.

При частковому обмеженні течії з боку внутрішньої бічної поверхні (див. рис. 8) відбувається зміщення нейтрального радіусу в бік меншого діаметра. При повному обмеженні течії металу зі сторони внутрішньої або зовнішньої бічної поверхні (див. рис. 9-10) відбувається зміщення нейтрального радіусу на внутрішній і зовнішній діаметр відповідно. Таким чином, переміщення нейтрального перерізу в залежності від бокового підпору показано як теоретично, так і експериментально.

У підсумку слід зазначити, що отримане в аналітичному вигляді замкнений розв'язок вісесиметричної задачі теорії пластичності з використанням гармонійних функцій дозволяє врахувати основні фактори, які впливають на неоднорідність пластичної формозміни (коефіцієнт контактної тертя, фактор форми) при визначенні компонентів тензора напружень і тензора швидкостей деформацій, як на контакті, так і в кожній точці осередку деформації. Особливістю даного розв'язку є те, що поля напружень та поля швидкостей деформацій можуть бути описані однаковими координатними гармонійними функціями. Крім того, розподіл контактних напружень у всьому осередку деформацій описується єдиною формулою. Раніше осередок деформації описувався за допомогою різних законів тертя (Амантона і Зібеля), з розбивкою на три зони, включаючи штучно прийняту перехідну ділянку.

Представлений аналітичний розв'язок задачі теорії пластичності може свідчити про достовірності та надійності результату, вибір реальних законів пластичної формозміни для контактних задач теорії пластичності включно.

Наведені в дисертації методика визначення напружено-деформованого стану циліндричного порожнього тіла може бути використана в реальних виробничих умовах при проектуванні нових та уточненні існуючих технологічних процесів виробництва деталей типу кілець, бандажів, матриць прес форм, відмовившись від трудомістких рішень методом скінчених елементів, варіаційних методів.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на розв'язання поставленої науково-технічної задачі, пов'язаної з розробкою математичної моделі процесу пластичної формозміни порожнистих тіл оберту в осьовому напрямку, з врахуванням основних технологічних факторів, що впливають на неоднорідність деформування.

У роботі отримані такі основні наукові результати:

1. Аналіз літературних джерел вказує на широке поширення порожнистих циліндричних виробів, типу кілець, у машинобудівному і металургійному виробництвах. При цьому їх виготовлення методами пластичного формоутворення характеризується складним напружено–деформованим станом, що проявляється в неоднорідності розподілу деформацій та напружень в об'ємі, різній формозміні на контакті і в середині металу, що обробляється. Основними чинниками, що впливають на неоднорідність деформації є наявність і величина контактної тертя; співвідношення довжини і висоти осередку деформації; геометрія інструменту. При цьому, процеси протікають в усьому осередку деформації враховуються контактними напруженнями, і навпаки, умови на контакті впливають на характеристики формозміни в об'ємі. Таким чином, врахувати нерівномірність деформації є можливим тільки при вирішенні плоскої або просторової задачі теорії пластичності.

2. Нерівномірність напружено–деформованого стану металу на практиці визначається однаковими технологічними параметрами, що свідчить про їх відповідність. Цій відповідності, в теоретичному плані, показана постановка і вирішена на базі методу гармонійних функцій замкнена вісесиметрична задача теорії пластичності в аналітичному вигляді. Отримано вирази для визначення нормальних і дотичних складових тензора напружень, а також складових тензора швидкостей деформації.

3. Запропоновано математичну модель зміцнювального пластичного середовища в умовах вісесиметричного напруженого стану, яка дозволяє враховувати як технологічні параметри пластичної формозміни (коефіцієнт тертя, фактор форми, внутрішній і зовнішній підпір), так і кінематичні параметри осередку деформації (швидкість деформації, ступінь деформації і температура).

4. Проведено аналіз впливу вище наведених факторів на величину і характер розподілу нормальних і дотичних напружень в осередку деформації циліндричного порожнистого тіла під дією осьового навантаження.

5. Наведено рішення прикладних задач теорії пластичності з визначення нормальних і дотичних напружень, як на контакті, так і в об'ємі деформованої заготовки, при одно- і двозонній течії металу. Отримані результати по величині і характеру розподілу напружень якісно і кількісно співпадають з загальноприйнятими положеннями.

6. Для підтвердження отриманих теоретичних результатів, було проведено дослідження методом скінченних елементів на базі програмного продукту

ANSYS/LS-DYNA. Відносна похибка величин відносного середнього контактного напруження, що співставлялись, не перевищувала 15%.

7. Наведені в дисертації методи визначення напружено–деформованого стану циліндричного порожнього тіла можуть бути використані при проектуванні нових та уточнення існуючих технологічних процесів виробництва деталей типу кілець, бандажів, матриць прес форм, тощо

8. Методика розв'язування вісесиметричної задачі теорії пластичності при осаді порожнистих циліндричних виробів була апробована на АТ «Мотор Січ» для визначення напружено–деформованого стану при пластичній формозміні деталей типу кілець авіадвигунів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Плоская задача теории пластичности в цилиндрических координатах / В.В. Чигиринский, О.М. Силенко, С.А. Силенко, А.Ю. Матюхин // Сборник докладов международной научно-технической конференции 21-26 сентября 2009г. «Прогрессивные технологии пластической деформации».-М.: Дом МИСиС, 2009.-С.345-351.

2. Чигиринський В.В. Рішення осесиметричної плоскої задачі теорії пластичності в напруженнях / В.В. Чигиринський, С.А. Силенко, А.Ю.Матюхін // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.-ЗНТУ, 2010.-№1.- С.121-125.

3. Чигиринський В.В. Розробка математичної моделі радіального тиску пластичного середовища при осадці полів тіл обертання / В.В.Чигиринський, А.Ю. Матюхін, В.В. Падалка // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».- НТУ «КП», 2011.- С. 46-50.

4. Чигиринский В.В. Разработка математической модели радиального давления пластической среды при осадке полых тел вращения/В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин, Л.А. Якубович // Сборник докладов международной научно-технической конференции 18-20 октября 2011 «Инновационные технологии обработки металлов давлением».-М.: Дом МИСиС, 2011.- С. 455-462.

5. Чигиринский В.В. Исследование напряженного состояния при осадке тел вращения в условиях внешней радиальной нагрузки/В.В.Чигиринский, А.Ю. Матюхин // Вестник двигателестроения.-Запорожье, АО «Мотор Сич»,2012.- №1.-С. 169-173.

6. Чигиринский В.В. Разработка математической модели осадки полых тел вращения в условиях неоднородного пластического течения / В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин//Обработка материалов давлением: сб.трудов ДонНГМА. - Краматорск, 2012.-№3.-С. 9-14.

7. Чигиринский В.В. Влияние радиальных нагрузок при осадке толстостенной трубы на изменение напряженного состояния металла/ В.В.Чигиринский, А.Ю. Матюхин // Обработка материалов давлением: сб.трудов ДонНГМА. - Краматорск, 2013.- №1.-С. 58-64.

8. Чигиринский В.В. Граничные условия при решении плоской задачи пластичности в цилиндрических координатах / В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении.- Запорожье: ЗНТУ, 2014.- № __-С. 138-142.

9. Чигиринский, В.В. Решение осесимметричной задачи в условиях одностороннего течения кольцевых заготовок при осадке / В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин, С.М. Ечин // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: XVI International Scientific Conference, 26-29 мая 2015 г.: сб. докл.- Czestochowa, 2015.- S. 121-129.

10. Чигиринский, В.В. Решение прикладных задач теории пластичности полуобратным методом/ В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин // Обработка материалов давлением: сб.трудов ДонНГМА. - Краматорск, 2015.- №2.-С. 51-55.

11. Исследование напряженного состояния толстостенной трубы в условиях всестороннего сжатия в радиальном и осевом направлениях / В.В. Чигиринский, В.И. Дубина, А.Ю. Матюхин, В.В. Падалка // Прогресивна техніка і технологія – 2010. Тези доповідей XI Міжнар. наук.-техн. конференції, 18-21 травня 2010 р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2010. – С. 53-54.

12. Чигиринский В.В. Разработка математической модели радиального давления пластической среды при осадке полых тел вращения / В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин, Л.А. Якубович // Инновационные технологии обработки металлов давлением. Тезисы докладов междунар. научн.-техн. конференции, 18-20 октября 2011 г.- Москва: НИТУ «МИСиС».-2011. - С. 99-100.

13. Чигиринский В.В. Математическая модель сложной среды в условиях осесимметричного напряженного и плоскодеформированного состояния / В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин // Прогресивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок. Тезисы докладов IX Междунар. научн.-техн. конференции, 24-29 сентября 2012 г. – Запорожье-Алушта: АО «Мотор-Сич». – 2012. – С. 171-172.

14. Чигиринский В.В. Влияние радиальных нагрузок при осадке толстостенной трубы на изменение напряженного состояния металла / В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин // Машини і пластична деформація металів. Тези доповідей II Міжнар. наук.-техн. конференції, 19-22 листопада 2012 р. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2012. – С. 18-19.

15. Чигиринский В.В. Граничные условия при решении прикладных задач теории пластичности полуобратным методом / В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин, А.А. Ленюк // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Тези доповідей V Міжнар. наук.-техн. конференції, 19-23 травня 2014 р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 15-17.

16. Чигиринский В.В. Определение граничных условий при решении плоской задачи пластичности в цилиндрических координатах / В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта. Тези доповідей XV Міжнар. наук.-техн. конференції, 23-27 червня 2014 р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 67.

Додаткові публікації:

17. Чигиринский, В.В. Реальная математическая модель пластической среды в условиях осесимметричного напряженного состояния /В.В. Чигиринский, А.Ю. Матюхин // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: XVI International Scientific Conference, 26-29 мая 2015 г.: статья докл.- Czestochowa, 2015.- S. 129-134.

18. Матюхин, А.Ю. Распределение неравномерности деформации в металле и факторы, влияющие на ее образование / А.Ю. Матюхин // Обработка материалов давлением: сб.трудов ДонНГМА. - Краматорск, 2015.-№2.-С.254-258.

АНОТАЦІЯ

Матюхін А.Ю. Моделювання процесів пластичної формозміни товстостінних порожнистих тіл обертання з використанням гармонійних функцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню вісесиметричної задачі теорії пластичності в аналітичному вигляді. Всі процеси пластичної формозміни металів характеризуються складним напружено-деформованим станом. Це виявляється в неоднорідності розподілу напружень і деформації за об'ємом, різній формозміні на контакті і всередині металу, що обробляється. Експериментальні дані показують, що має місце відповідність напруг і деформацій з позиції нерівномірності пластичної формозміни. Отже, для одержання достовірного рішення задачі теорії пластичності необхідно реалізовувати дане рішення в замкнутому вигляді, тобто повинні бути визначені як статичні, так і кінематичні параметри процесу пластичної формозміни.

Виходячи з цих положень була поставлена та розв'язана замкнута задача теорії пластичності в циліндричних координатах, що дозволило узгодити поля напружень і деформацій, а отже, врахувати основні чинники, що викликають неоднорідність пластичної формозміни.

Ключові слова: напружено–деформований стан, математична модель пластичного середовища, швидкість та ступень деформації, вісесиметрична задача, теорія пластичності, гармонійні функції.

АННОТАЦИЯ

Матюхин А.Ю. Моделирование процессов пластического формоизменения толстостенных полых тел вращения с использованием гармонических функций. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела. - Запорожский национальный технический университет, Запорожье, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению осесимметричной задачи теории пластичности в аналитическом виде. Все процессы пластического формоизменения металлов характеризуются сложным напряженно-деформированным состоянием. Это проявляется в неоднородности распределения напряжений и деформации по объему, различном формоизменении на контакте и внутри обрабатываемого металла.

Экспериментальные данные показывают, что имеет место соответствие напряжений и деформаций с позиции неравномерности пластического формоизменения. Следовательно, для получения достоверного решения задачи теории пластичности необходимо реализовывать данное решение в замкнутом виде, т.е. должны быть определены как статические, так и кинематические параметры процесса пластического формоизменения.

Исходя из этих положений была поставлена и решена замкнутая задача теории пластичности в цилиндрических координатах, что позволило согласовать поля напряжений и поля деформаций, а следовательно, учесть основные факторы вызывающие неоднородность пластического формоизменения. Особенностью данного решения является то, что поля напряжений и деформаций могут быть описаны одинаковыми блоками координатных гармонических функций.

На базе метода гармонических функций разработана реальная математическая модель пластической среды в условиях осесимметричного напряженного состояния, что позволяет определить компоненты тензора напряжений и тензора деформаций в зависимости от таких факторов пластического формоизменения как: скорость и степень деформации, температура заготовки, химический состав материала, коэффициент контактного трения, фактор формы, и т.п.

Рассмотрено решение ряда прикладных задач теории пластичности связанных с определением напряженно-деформированного состояния толстостенной полой цилиндрической заготовки при ее пластическом формоизменении в осевом направлении при различных схемах деформирования. Так, были получены теоретические данные по распределению напряжений при свободной осадке детали типа кольца между двумя шероховатыми плитами, а так же, с частичным или полным ограничением течения металла со стороны внутренней и наружной боковой поверхности (осадка на оправке или в контейнере).

Для оценки полученного теоретического результата был поставлен и проведен лабораторный эксперимент по изучению влияния внешнего воздействия инструмента на боковую поверхность осаживаемого образца, смещения радиуса нейтральной поверхности, а также течения металла для двухзонного и однозонного очага деформаций. При свободной осадке между двумя шероховатыми плитами имеет место двухзонный очаг деформации, когда

стенки полого цилиндрического изделия растекаются относительно радиуса нейтрального сечения, тем самым увеличивая наружный диаметр и уменьшая внутренний. При частичном ограничении течения со стороны внутренней боковой поверхности происходит смещение нейтрального радиуса в сторону меньшего диаметра. При полном ограничении течения металла со стороны внутренней или наружной боковой поверхности происходит смещение нейтрального радиуса на внутренний и наружный диаметр соответственно.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, математическая модель пластического среды, скорость и степень деформации, осесимметричная задача теории пластичности, гармонические функции.

ABSTRACT

Matyukhin, A. Modeling of processes of plastic forming of thick-walled hollow bodies of rotation with use of harmonic functions. Manuscript.

Thesis for scientific degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 01.02.04 – Mechanics of a deformable solid body. - Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, 2016.

Dissertation work is devoted to the solution of an axially symmetric task of the theory of plasticity in an analytical look. All processes of plastic forming of metals are characterized by the difficult intense deformed state. It is shown in heterogeneity of distribution of tension and deformation in volume, various forming on contact and in the processed metal. Experimental data show that compliance of tension and deformations with a position of unevenness of plastic forming takes place. Therefore, for obtaining the authentic solution of a task of the theory of plasticity it is necessary to realize this decision in the closed look, i.e. bothm, as static and kinematic parameters of process of plastic forming have to be determined.

Proceeding from these provisions the closed task of the theory of plasticity in cylindrical coordinates has been set and solved that has allowed to approve fields of tension and the field of deformations and consequently, to consider the major factors causing heterogeneity of plastic forming.

Key words: stress-strain state, the mathematical model of the plastic medium, the speed and degree of strain, axisymmetric problem of plasticity theory, harmonic functions.