

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**ГУЦАЛЮК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 621.7.011: 621.777. 22

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО РЕДУКУВАННЯ  
КОРОТКИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК МЕТОДАМИ  
ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МЕХАНІКИ**

05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Грушко Олександр Володимирович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри опору матеріалів та  
прикладної механіки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кухар Володимир Валентинович,**  
Приазовський державний технічний університет,  
завідувач кафедри обробки металів тиском;

доктор технічних наук, доцент  
**Сивак Роман Іванович,**  
Вінницький національний аграрний університет,  
професор кафедри загальнотехнічних дисциплін  
та охорони праці.

Захист відбудеться «13» грудня 2019 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.03 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК

Автореферат розісланий «12» листопада 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. І. Сухоруков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** В зв'язку з появою нових матеріалів та застосуванням існуючих матеріалів у виробках спеціального призначення, в виробках, до яких висуваються особливі вимоги до механічних властивостей, виникає необхідність обробки цих матеріалів ефективними методами обробки тиском. Наприклад, використання спеченого сплаву системи W-Ni-Fe в виробках спеціального призначення регламентується конкретними вимогами до механічних властивостей виробу (нерівномірність розподілу деформацій та твердості, максимальна залишкова пластичність тощо). Для обробки таких вісесиметричних заготовок, які, як правило, мають співвідношення довжини до діаметра 2..5 (далі - короткі) можуть бути запропоновані низка методів холодного пластичного деформування (волочіння, пресування, кування, тощо). Зважаючи на особливості технології отримання вихідних заготовок та їх розмірів в Інституті Надтвердих Матеріалів ім. В. М. Бакуля (Відділ № 20 - Формування прецизійних елементів складнопрофільних виробів) була розвинута технологія прямого видавлювання цих заготовок з відносно невеликими обтисками (натягами), яка отримала назву редукування. Даний спосіб забезпечує високу точність і якість виробів та є одним з ефективних способів холодної формозміни коротких циліндричних заготовок з прогнозованими механічними характеристиками. Визначення параметрів процесу є предметом досліджень багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених, зусилля яких були спрямовані, головним чином, на енергосилові параметри процесів. Разом з тим, питання технологічної механіки, до яких відноситься гранична формозміна заготовок, формування фізико-механічних властивостей матеріалів, забезпечення технологічної спадковості на основі моделі (карти) матеріалу, щоб попередити бракування внаслідок руйнування металу недостатньо відображені в науково-технічній літературі. У зв'язку з викладеним, завдання подальшого розвитку і вдосконалення технологічних процесів редукування на основі формування карт матеріалів, розробки розрахункових моделей і практичних рекомендацій щодо вибору технологічних режимів з метою підвищення ефективності процесів редукування коротких циліндричних заготовок є **актуальною** задачею.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано відповідно до Закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки" (Відомості Верховної Ради України, 2011 р., № 4, ст. 23; 2014 р., № 2-3, ст. 41) та постанови Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942 "Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року" (зі змінами від 23 серпня 2016 р. № 556) за напрямком «Створення та застосування технологій отримання, зварювання, з'єднання, діагностики та оброблення конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів». Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ і наукової школи "Розвиток

феноменологічної теорії руйнування матеріалів при великих пластичних деформаціях та розробка на цій основі нових та удосконалення існуючих технологій обробки металів тиском". Автор був виконавцем держбюджетних науково-дослідних робіт ВНТУ, передбачених планами Міністерства освіти і науки України та виконаних на кафедрі опору матеріалів та прикладної механіки (ОМППМ) ВНТУ: № держреєстрації 0112U001366; № держреєстрації 0114U003458; № держреєстрації 0116U004711; госпоговірної теми № держреєстрації 0117U005540; а також теми III-2-15 (тема виконувалась в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України).

#### **Мета і завдання дослідження:**

Метою роботи є підвищення ефективності процесів холодного редукування на основі дослідження напружено-деформованого стану, деформовності, оцінки технологічної спадковості заготовок та удосконалення технологічних режимів редукування коротких заготовок.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені і вирішені такі основні завдання:

- встановити шляхи і проблеми розвитку холодної обробки циліндричних заготовок редукуванням;

- сформувати карту матеріалу сплаву системи W-Ni-Fe (W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%), яка містить криву зміцнення, діаграму пластичності, тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень  $\sigma_i$  – інтенсивність деформацій  $\epsilon_i$ ;

- виконати аналіз напружено-деформованого стану циліндричних заготовок з відносною довжиною 2..5 в процесі редукування методом скінченних елементів (МСЕ) та здійснити аналіз механіки вказаного процесу при варіюваних параметрах процесу;

- провести аналіз критеріїв деформовності, з метою їх застосування в процесах редукування; проаналізувати шляхи деформування в процесі редукування та виявити їх особливості, що істотно впливають на деформовність; розробити розрахунковий апарат оцінки раціональних параметрів процесу редукування на основі оцінки деформовності заготовок з використанням феноменологічних критеріїв деформування з врахуванням комплексу факторів, що роблять істотний вплив на пластичність;

- розробити рекомендації щодо оцінки показників технологічної спадковості на стадії прогнозування технологічного процесу редукування для сплаву системи W-Ni-Fe.

**Об'єкт дослідження.** Холодне пластичне деформування циліндричних заготовок.

**Предмет дослідження.** Закономірності процесу редукування коротких циліндричних заготовок, механіка процесу, деформовність та технологічна спадковість виробів.

**Методи дослідження.** В основу теоретичних досліджень покладено методи прикладної теорії пластичності, феноменологічна теорія деформовності металу, МСЕ.

Фізико-механічні характеристики досліджуваних матеріалів визначали із застосуванням сучасних приладів і обладнання. Експерименти проводилися на обладнанні кафедри ОМІМ ВНТУ. Натурні випробування та фізичне моделювання процесу редукування виконувались в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України. Експериментально перевірка результатів теоретичних розрахунків проводилась із застосуванням методу твердості.

Для оцінки точності отриманих результатів і ступеня збіжності, теоретичних і експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що:

- вперше побудовано шляхи деформування металу в характерних точках коротких заготовок в залежності від основних технологічних параметрів процесу прямого видавлювання (редукування) та обґрунтовано розташування небезпечних зон за ознакою вичерпання ресурсу пластичності металу;

- вперше сформовано карту матеріалу для сплаву системи W-Ni-Fe, яка складається з кривої течії, діаграми пластичності та графіка залежностей «твердість-напруження-деформації». Встановлені закономірності механіки процесу редукування коротких циліндричних заготовок, зокрема визначено напружено-деформований стан в процесі, величини контактних напружень та енергосилових характеристик в т. ч. для матеріалів з подібною реологією до дослідженого сплаву;

- отримав подальший розвиток метод оцінки деформовності металу заготовок в процесі холодного редукування, який відмінно від існуючих встановлює межі використання критеріїв деформовності в залежності від кривини шляху деформування, величини гідростатичного тиску і показника, що враховує вплив третього інваріанту тензора напружень;

- набув подальшого розвитку метод оцінювання технологічної спадковості для виробів, отриманих способами холодного формоутворення, який відмінно від існуючих полягає у визначенні величини таких параметрів: твердості виробу, нерівномірності розподілу деформацій та залишкової пластичності, що дозволяє визначити раціональні технологічні параметри холодного редукування коротких заготовок зі сплаву системи W-Ni-Fe.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Практичну цінність дисертаційної роботи представляють наступні її основні результати:

- результати досліджень фізико-механічних властивостей матеріалу сплаву системи W-Ni-Fe (W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%), серед яких крива зміцнення, діаграма пластичності, тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень  $\sigma_i$  – інтенсивність деформацій  $\epsilon_i$ ;

- методичні рекомендації щодо вибору феноменологічних критеріїв деформування при розрахунках використаного ресурсу пластичності для характерних зон заготовки в процесі її редукування;

- методика визначення технологічних параметрів процесу редукування, яка дозволяє отримати заготовки з прогнозованими властивостями без

технологічних відмов при вивченні поведінки реологічно подібних матеріалів; врахування впливу історії деформування; градієнта деформацій.

**Особистий внесок здобувача** полягає в тому, що у дисертації не використовувалися ідеї співавторів публікацій. Усі принципові теоретичні й експериментальні результати отримані автором самостійно. При виконанні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автором отримані наступні результати: автор виконав експериментальні дослідження, що пов'язані з формуванням карти матеріалу, проаналізував отримані результати, побудував криву течії, градувальний графік твердість-напруження-деформації, діаграму пластичності [1], [2], [7]; автор встановив кількісну величину похибки деформаційних критеріїв руйнування для шляхів деформування різної кривини [3], [4], [5]; автором сформована імітаційна модель процесу редукування, отримані основні залежності для розрахунку параметрів механіки процесу редукування, на основі яких отримано напружено-деформований стан для процесу редукування [6]; автором розвинута методика оцінки впливу параметрів процесу на технологічну спадковість та якість одержаних виробів [8].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати роботи доповідались на наукових конференціях, семінарах. Серед них:

VI, VII, VIII, X міжнародна науково-технічна конференція (МНТК) «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ-Херсон, 2015, 2016, 2017, 2019); X МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії» (Харків 2014); щорічних НТК ВНТУ (Вінниця 2012-2019); XIX МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ 2016); Наукові семінари ВНТУ та КПІ (2019).

**Публікації.** Матеріали та основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 20 наукових роботах, з них 5 статей у спеціалізованих фахових виданнях згідно переліку МОН України, 1 публікація у закордонному виданні (входить до наукометричної бази «Scopus»), 12 тез у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій. За результатами досліджень отримано патент України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 143 сторінки машинописного тексту, з них 110 сторінок основного тексту, 63 рисунка і 9 таблиць. Список використаних джерел містить 102 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, наводиться загальна характеристика роботи, сформульована мета і задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, приведені предмет та об'єкт дослідження, методи досліджень, особистий внесок здобувача,

розкрита наукова новизна і практична цінність результатів роботи, їх апробація і публікація отриманих результатів.

У першому розділі проведений аналіз існуючих способів холодної обробки тиском вісесиметричних заготовок та аналіз ефективності форми використовуваного інструменту. Проаналізовано сучасний рівень вивчення напружено-деформованого стану процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок (С. А. Зайдес, В. В. Кухар, В. А. Огородніков, Ю. Г. Проскураков, А. М. Розенберг, О. О. Розенберг, Ю. А. Цеханов, С. Є. Шейкін та ін.). Виявлено ряд невирішених задач, які пов'язані з оцінкою механіки вісесиметричного деформування різних сплавів з метою отримання потрібних властивостей заготовок, а саме: пластичність, міцність, енергопоглинання та ін. Аналіз літературних даних показав, що для отримання потрібних фізико-механічних властивостей циліндричних заготовок із порошкових сплавів, необхідно використати методи вісесиметричного пластичного деформування, а саме технологічний процес охоплюючого деформування - редукування.

Сучасні аналітичні та експериментально-розрахункові методи розрахунку дозволяють визначити напружено-деформований стан вісесиметрично деформованих заготовок в будь-якій матеріальній точці, але для прогнозування механічних властивостей потрібно з достатньою точністю розраховувати використаний ресурс пластичності, який залежить від параметрів процесу деформування (кут нахилу матриці, величина обтиску, умови тертя в місці контакту метал-інструмент та ін.).

Оцінка використаного ресурсу пластичності за допомогою сучасних феноменологічних критеріїв деформовності є предметом досліджень багатьох вчених (Г. Д. Деля, В. А. Огороднікова, В. М. Михалевича, В. Л. Колмогорова, Ю. Г. Калпіна, Ю.К. Філіппова, Р. І. Сивака та ін.). В структуру критеріїв входить карта матеріалу (діаграма пластичності, крива текучості, стандартні механічні характеристики) та шляхи деформування в координатах: накопичена інтенсивність деформацій–показники напруженого стану. Зокрема, акцентовано на деформаційних скалярних критеріях, які для процесу редукування дають найменшу похибку з відносно простою процедурою реалізації розрахунків. Так, критерій Г. А. Смірнова-Аляєва, в якому не враховується історія деформування, для процесу редукування набуває вигляду

$$\psi = \frac{e_i(\delta, \gamma)}{e_p(\eta_k)} \leq 1, \quad (1)$$

де  $\delta$  - відносний натяг,  $\gamma$  - кут нахилу матричного отвору,  $\eta_k$  - показник напруженого стану в небезпечній області заготовки,  $e_i$  - інтенсивність деформацій,  $e_p(\eta_k)$  - накопичена ступінь деформації до моменту руйнування.

Модифікований скалярний критерій В. А. Огороднікова, що враховує історію деформування та третій інваріант тензора напружень є найбільш загальним для оцінки деформовності монотонних процесів холодного

формозмінювання, що характеризуються складними шляхами деформування та великою їх кривиною, до яких належить, зокрема, процес редукування:

$$\psi = \int_0^{\bar{e}_i^*} \left( 1 + a \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right) \right) \frac{[\bar{e}_i(\eta, \chi)]^{a \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}}{[\bar{e}_p(\eta, \chi)]^{1 + a \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}} \leq 1. \quad (2)$$

Для отримання вказаної інформації слід сформувати карту матеріалу досліджуваного сплаву W-Ni-Fe, а також вивчити напружено-деформований стан деформованої заготовки в залежності від величини параметрів процесу редукування.

Варто відмітити, що існуючі сучасні феноменологічні критерії мають обмежену область використання – як по показниках напруженого стану, так і по швидкості їх зміни в процесах обробки металів тиском. Експериментальні дані, які наведені в літературному огляді показують, що накопичення пошкоджень в деформованих матеріалах, а також заліковування дефектів залежить від «напрямку деформування», тобто від знаку похідних функції показників напруженого стану. В зв'язку з цим потрібно дати оцінку точності різних критеріїв стосовно вибраного нами процесу редукування сплаву W-Ni-Fe.

Розв'язок даної науково-технічної задачі може бути забезпечений шляхом більш глибокого вивчення напружено-деформованого стану та деформовності вісесиметричних заготовок в процесі редукування для характерних областей заготовки.

Пошук оптимального співвідношення хімічного складу спечених сплавів на основі вольфраму не є предметом наших досліджень, однак в рамках виконаних експериментів з'ясувалось, що збільшення вмісту вольфраму на 1% у складі сплаву W-Ni-Fe веде до суттєвих змін у його фізико-механічних властивостях, а саме: збільшення границі міцності на 3,26%, збільшенню відносного видовження на 17,6% та зменшення абсолютного відносного залишкового звуження на 34%.

Вказана інформація є основою для визначення напружено-деформованого стану та оцінки деформовності відповідних заготовок.

В результаті проведеного огляду обґрунтовано необхідність більш глибокого вивчення процесів редукування в характерних ділянках заготовки. На основі проведеного аналізу сформульовані мета роботи і завдання дослідження.

**У другому розділі** обґрунтовано та обрано методи досліджень, визначені експериментальним шляхом фізико-механічні властивості досліджуваного сплаву.

Здійснено вибір методів досліджень. Представлено результати формування карти сплаву W-Ni-Fe, яка включає такі механічні характеристики сплаву, як: крива текучості (рис. 1) в координатах  $\sigma_i = f(e_i)$  – інтенсивність напружень та інтенсивність деформацій (універсальна механічна характеристика матеріалу), яка використовується нами для розрахунку напружено-деформованого стану в процесах редукування та в якості інформації



при оцінці деформовності заготовок в процесі редукування. Крива текучості апроксимована степеневою функцією з коефіцієнтами  $A=1709$  МПа,  $n=0,259$ .

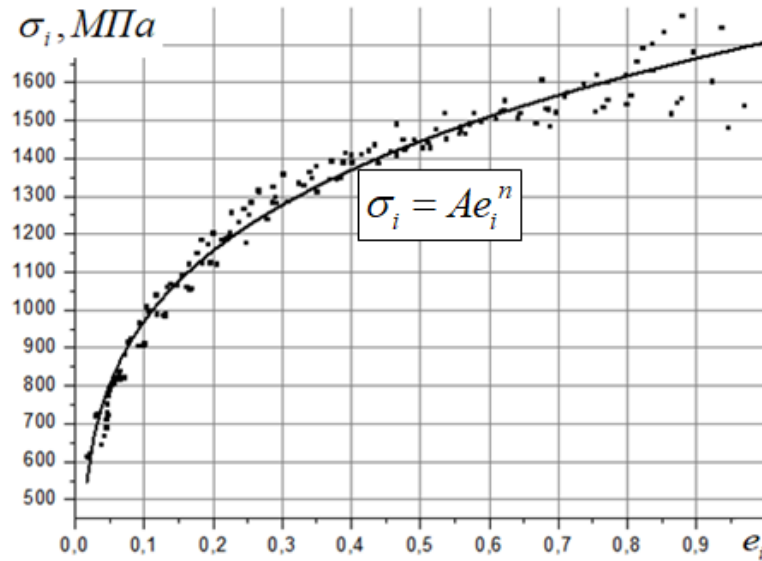


Рисунок 1 – Крива текучості та діаграма пластичності сплаву W-Ni-Fe

Також отримані експериментальні дані по діаграмі пластичності (рис. 2) в координатах: накопичена інтенсивність деформації до моменту руйнування – показник напруженого стану рівний  $\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$ .

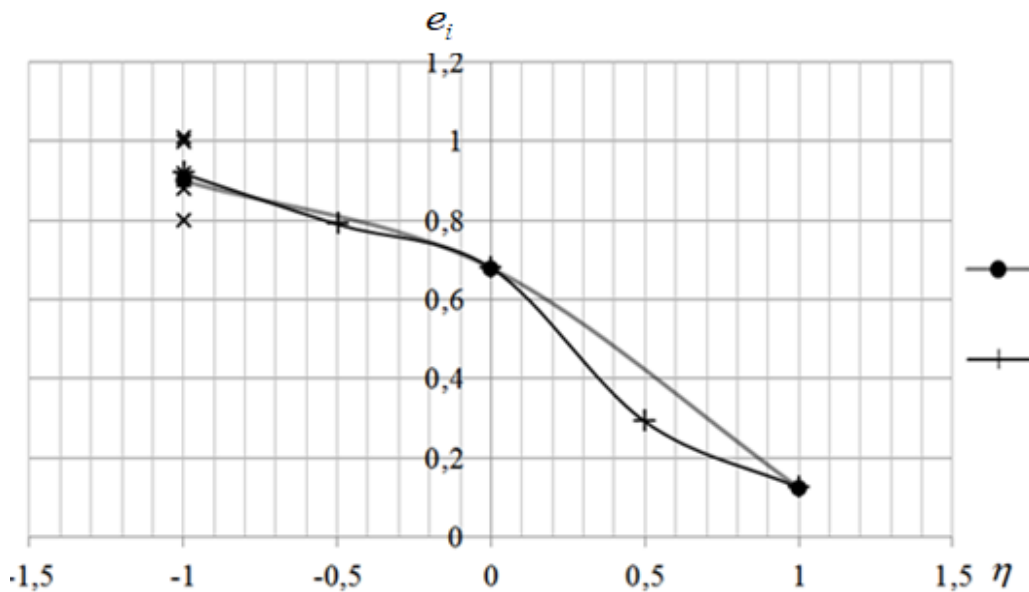


Рисунок 2 – Діаграма пластичності сплаву W-Ni-Fe

Для діаграми пластичності в координатах  $e_p = f(\eta)$  показано, що в області від  $\eta=-1$  до  $\eta=0$  коефіцієнт чутливості пластичності до схеми напруженого стану рівний  $\lambda_2 = \ln \frac{e_p(\eta=-1)}{e_p(\eta=0)} = 0,3$ , що характеризується незначним ростом пластичності в зв'язку з «пом'якшенням» схеми напруженого стану. В області

$0 \leq \eta \leq 1$  коефіцієнт чутливості рівний  $\lambda_1 = \ln \frac{e_p(\eta=0)}{e_p(\eta=1)} = 1,75$  що характеризує більш інтенсивний ріст пластичності, та є наслідком більш жорсткої схеми напруженого стану.

Крім того, отримані данні про зв'язок твердості з інтенсивністю напружень та деформацій (див. рис. 3), що дозволяє в подальшому використовуючи гіпотезу про незалежність виду напруженого стану, зв'язку твердості, інтенсивності напружень та інтенсивності деформацій. Побудовані тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень  $\sigma_i$  – інтенсивність деформацій  $e_i$  сплаву W-Ni-Fe. Показано, що залежність твердості HV від інтенсивності напружень  $\sigma_i$  практично лінійна, при цьому твердість зростає в 1,35 рази при зростанні напруження текучості в 2,7 рази. Зв'язок твердості HV від інтенсивності деформацій  $e_i$  має степеневу залежність.

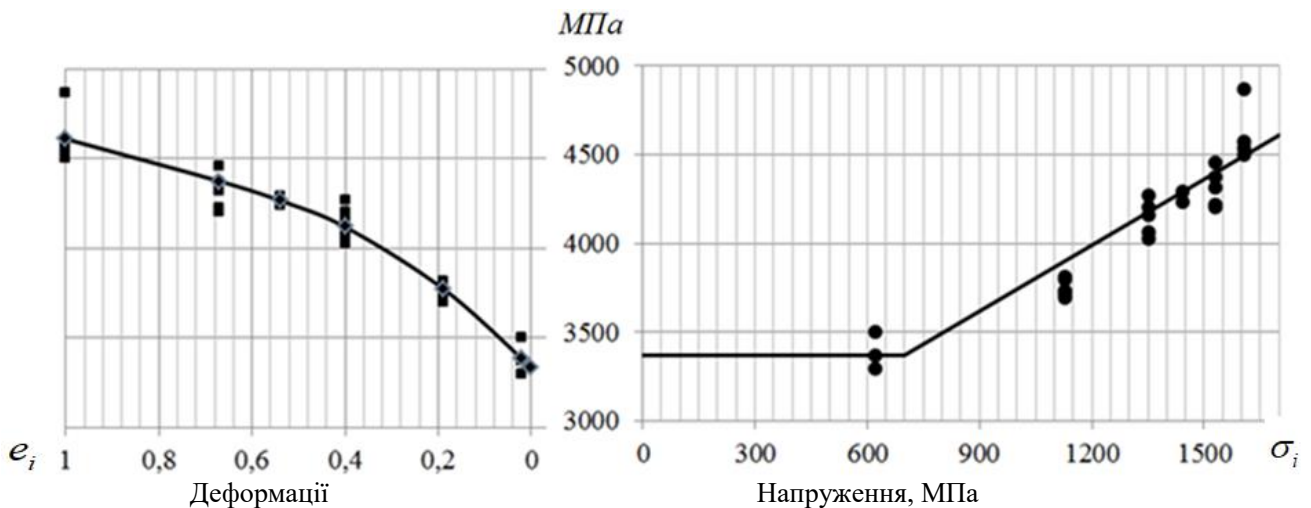


Рисунок 3 – Градувальний графік вольфрамового сплаву типу W-Ni-Fe (твердість (HV) – напруження – деформації)

**У третьому розділі** вивчалась механіка процесу редукування заготовок із сплаву W-Ni-Fe.

Для вивчення механіки процесу редукування використано експериментально-розрахункові методи визначення параметрів процесу деформування. Використання даних методів обумовлене можливістю уникнути ряду недоліків (руйнування заготовки, втрата її стійкості, зниження точності виробу та ін.). Формозміна оцінювалась на основі програмного моделювання з використанням методу скінчених елементів з подальшим порівнянням результатів розрахунку з натурним експериментом.

Дослідження процесу редукування було здійснено в таких діапазонах технологічних параметрів: кут нахилу матриці  $\gamma=3..15^0$ ; величина відносного натягу пари інструмент-заготовка  $\delta=0,01..0,13$ ; коефіцієнти апроксимації кривої течії:  $A=1731,6$  МПа;  $n=0,259$ ; швидкість деформування 0,2 м/с; модуль пружності  $E=1,4 \cdot 10^{10}$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ ; коефіцієнт тертя  $f=0,06..0,16$ .

Аналіз результатів моделювання виконувався з врахуванням умови, що властивості реологічно подібних матеріалів не впливають на кінематику процесу. Під час досліджень встановлено, що механіка процесу редукування характеризується наявністю трьох по довжині ділянок (рис.4), розміри яких на неусталеній фазі (зона I і III) процесу редукування слід забезпечувати мінімальними.

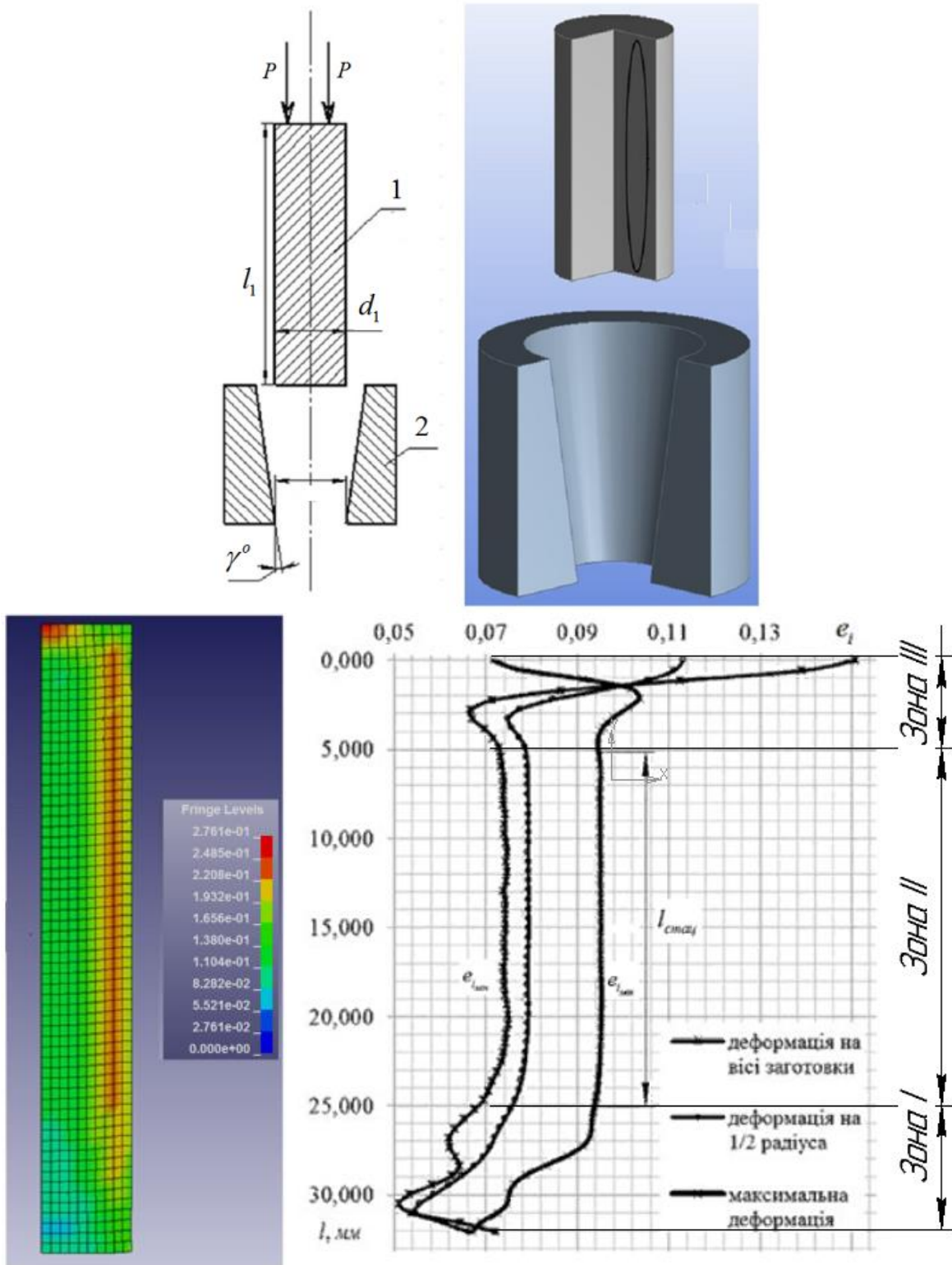


Рисунок 4 – Редукування заготовки (1 – заготовка, 2 - матриця)

Аналіз значень зусиль деформування показав, що величина коефіцієнту тертя в межах  $0,05 \leq f \leq 0,1$  практично не впливає на деформований стан процесу редукування, зокрема величина зусиль деформування при моделюванні процесу редукування в цих межах майже не змінювалась за інших сталих параметрів. Водночас, коефіцієнт тертя в межах  $0,05 \leq f \leq 0,1$  дозволяє забезпечити рівномірний розподіл деформацій по довжині заготовки, а збільшення коефіцієнта тертя супроводжується зростанням величини зон нестационарності процесу.

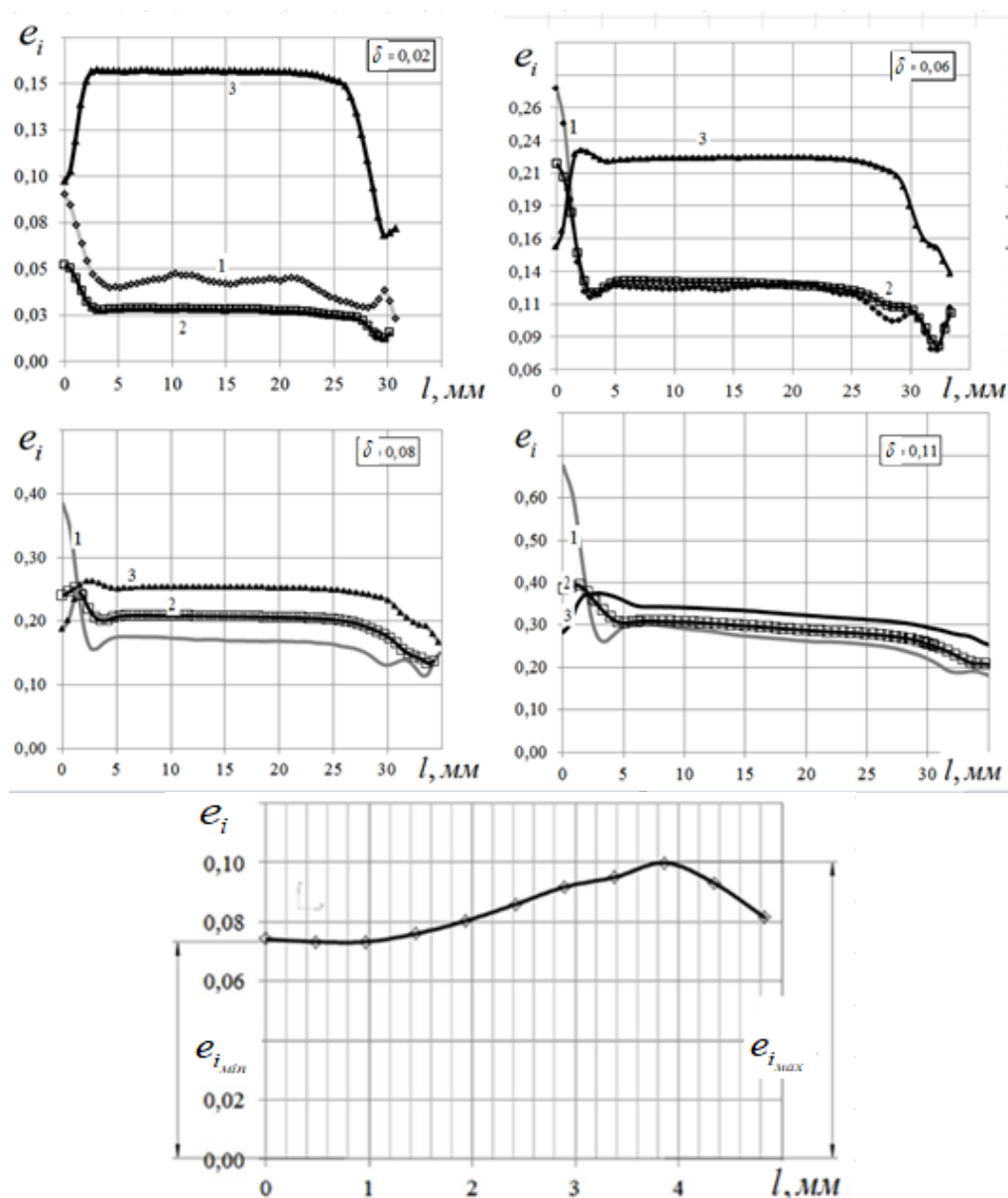


Рисунок 5 – Деформація заготовки при різних значеннях натягу (1-деформація на вісі симетрії; 2-деформація заготовки на  $1/2$  радіуса; 3-деформація на поверхні) та розподіл інтенсивності деформацій по перерізу стержня

За результатами імітаційного моделювання, що також підтверджується експериментально, встановлено суттєвий вплив відносного натягу  $\delta$  на механіку процесу редукування. З імітаційного моделювання маємо, що при

$\delta=0,02$  спостерігається переважно поверхневе зміцнення матеріалу заготовки, при  $0,02 \leq \delta \leq 0,1..0,11$  - матеріал заготовки зміцнюється по всьому перерізу ( $\delta \leq 0,1$  для  $\gamma = 3..5^0$ ;  $\delta \leq 0,11$  для  $\gamma = 7..13^0$ ), при  $\delta = 0,1..0,11$  - в заготовці спостерігається значна нерівномірність зміцнення по довжині. Найнебезпечнішою з точки зору руйнування є вісь симетрії в місці контакту з пуансоном. Розподіл деформацій по довжині зразка представлено на рис. 5.

Для забезпечення максимальної рівномірності деформацій введено коефіцієнт нерівномірності інтенсивності деформацій  $m = \frac{e_{i,\min}}{e_{i,\max}}$ , значення якого нормується на одиницю. Також, на основі методів математичної статистики отримана залежність (3), з допомогою якої можна встановити вплив технологічних параметрів процесу (обтиск, кут нахилу матриці) на коефіцієнт нерівномірності деформацій ( $m$ ). При збільшенні відносного обтиску та(або) зменшенні величини кута нахилу матриці зростає нерівномірність деформацій (коефіцієнт нерівномірності деформацій зменшується), зокрема: при  $\gamma=13^0$  матимемо  $\delta=0,06$  та  $m=0,75$ ; при  $\gamma=13^0$  та  $\delta=0,12$  та  $m = 0,65$  а також при  $\delta=0,04$  та  $\gamma=13^0$  матимемо  $m=0,2$ , а також при  $\delta=0,04$  і  $\gamma=5^0$  -  $m=0,5$ :

$$m = m_0 + X \cdot \gamma + Y \cdot \delta + Z \cdot \gamma^2 + L \cdot (\delta)^2 + J \cdot \gamma \cdot \delta, \quad (3)$$

де  $m_0=0.586 \pm 0,267$ ;  $X=-0,106 \pm 0,0045$ ;  $Y=10,5 \pm 0,569$ ;  $Z=0,0041 \pm 2,37 \cdot 10^{-4}$ ;  $L=-14,96 \pm 3,835$ ;  $J=-0,228 \pm 0,0296$ .

Як видно з рисунку 6 в зонах 1 і 2 спостерігаються розтягувальні напруження, що може стати причиною руйнування. (3 - вісь заготовки при виході з інструменту; 2 - близький до поверхні осередок деформацій). Подальше використання отриманих результатів буде полягати в оцінці використаного ресурсу пластичності в небезпечних ділянках.

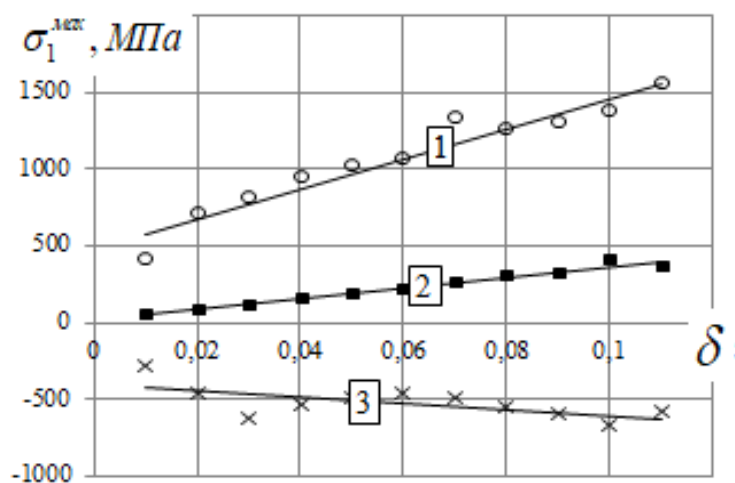


Рисунок 6 – Залежність максимальних головних нормальних напружень від величини відносного обтиску для: 1 – небезпечній точці деформування; 2 – осередку деформації в межах встановленого процесу; 3 – вісі симетрії заготовки в межах встановленого процесу.

З точки зору вибору раціональних параметрів процесу практичний інтерес також представляє вивчення полів напружень в зоні контакту інструменту та заготовки. Для кута нахилу матриці  $\gamma=7^\circ$  при обтисках  $\delta=0,01..0,11$  дотичні контактні напруження розподілені вздовж контуру матриці досить рівномірно з незначним зростанням до 200 МПа, тоді коли максимальне значення  $\sigma_n$  (для процесів з різними технологічними параметрами) знаходиться в таких межах  $-200 \geq \sigma_n \geq -1200$  (рис. 7), що треба враховувати при виборі відповідних умов змащення для запобігання схоплювання та налипання металу заготовки на інструмент.

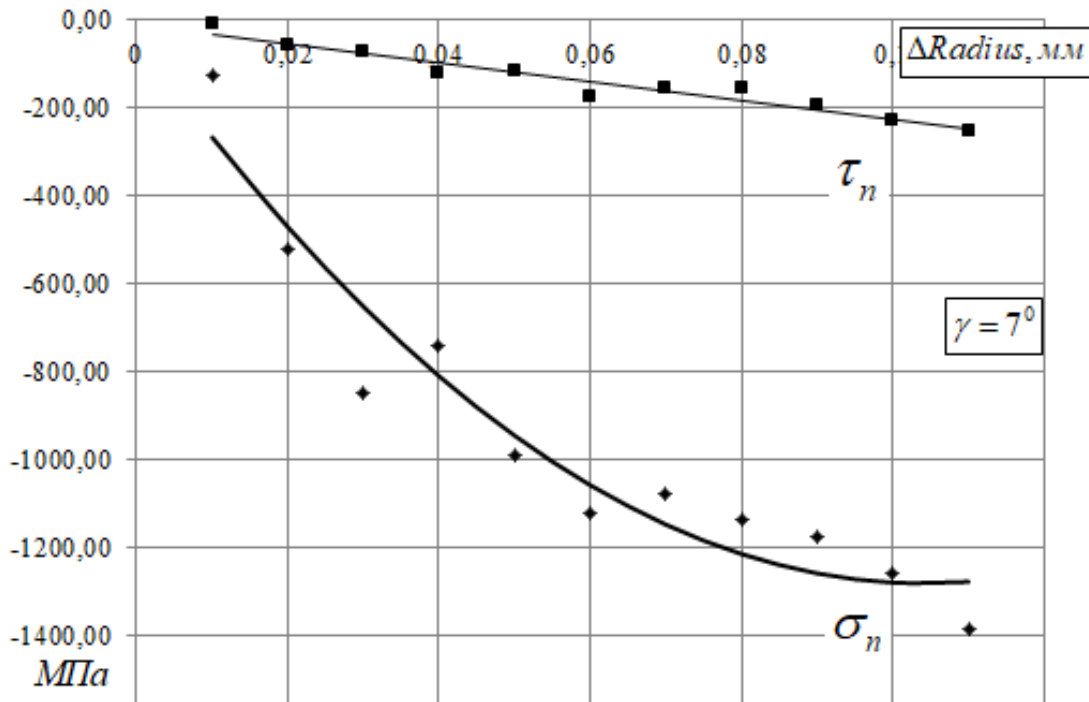


Рисунок 7 – Значення максимальних контактних напружень по контуру матриці для процесу редукування з кутом нахилу матриці  $\gamma=7^\circ$ .

Перерахунок необхідних величин компонент тензора напружень для нашого випадку вісесиметричного процесу на основі матеріалів з подібною реологією, що розширює область застосування отриманих результатів для розрахунку технологічних параметрів процесу редукування заготовки з різних конструкційних матеріалів можливе з використанням наступних формул (методика Грушко О. В.):

$$\sigma'_{cp} = \sigma_{cp} \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_{cp} \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (4)$$

$$\sigma'_\phi = \sigma_\phi \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (5)$$

$$\sigma'_z = \sigma_z \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_z \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (6)$$

$$\sigma'_r = \sigma_\rho \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (7)$$

$$\tau'_{rz} = \tau'_{zr} = \tau_{rz} \frac{A'}{1730^{(3,861n')}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (8)$$

$$\sigma'_n = \sigma_n \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_n \frac{A'}{1730^{(3,861n')}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (9)$$

$$\tau'_n = \tau_n \frac{A'}{1730^{(3,861n')}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (10)$$

$$F' = F_1 \frac{A'}{A_1} \left[ \frac{F_2 A_1}{F_1 A_2} \right]^{n_2 - n_1}. \quad (11)$$

$$\tau_{\rho\theta} = \tau_{\theta\rho} = \tau_{z\theta} = \tau_{\theta z} = 0, \quad (12)$$

де,  $\sigma_i$  - інтенсивність напружень модельного матеріалу W-Ni-Fe,  $\sigma'_i$  - інтенсивність напружень натурального матеріалу,  $\varepsilon_i$  - інтенсивність деформацій,  $A'$  та  $n'$  - коефіцієнти апроксимації для натурального матеріалу,  $\sigma_{cp}$  - середнє напруження в процесі для модельного матеріалу,  $\sigma'_{cp}$  - середнє напруження в процесі для натурального матеріалу,  $\sigma_\varphi$  - нормальні тангенціальні напруження в циліндричній системі координат для модельного матеріалу,  $\sigma'_\varphi$  - нормальні тангенціальні напруження в циліндричній системі координат для натурального матеріалу,  $\sigma_z$  - нормальні осьові напруження в циліндричній системі координат для матеріалу модельного,  $\sigma'_z$  - нормальні осьові напруження в циліндричній системі координат для натурального матеріалу,  $\sigma_r$  - нормальні радіальні напруження в циліндричній системі координат для модельного матеріалу,  $\sigma'_r$  - нормальні радіальні напруження в циліндричній системі координат для натурального матеріалу,  $\tau'_{rz}, \tau'_{zr}, \tau_{rz}$  - відповідно дотичні напруження для натурального матеріалу та модельного матеріалу,  $\sigma_n$  - нормальні контактні напруження для матеріалу модельного,  $\sigma'_n$  - нормальні контактні напруження для натурального матеріалу,  $\tau_n$  - дотичні контактні напруження для модельного матеріалу,  $\tau'_n$  - дотичні контактні напруження для натурального матеріалу,  $\tau_{\rho\theta}, \tau_{\theta\rho}, \tau_{z\theta}, \tau_{\theta z}$  - дотичні напруження в циліндричній системі координат.

У четвертому розділі виконана оцінка деформовності процесу редукування за допомогою використання феноменологічних критеріїв руйнування з подальшим прогнозуванням необхідних механічних властивостей деформованих виробів.

У просторі безрозмірних показників напруженого стану  $e_i = f(\eta, \chi, \mu_\sigma)$  найбільший інтерес представляють області, в яких шляхи деформування частинок матеріалу найбільш близько наближаються до діаграм пластичності.

Ці області являються небезпечними з точки зору ймовірності руйнування матеріалу заготовок. На рис. 8 показані шляхи деформування частинок матеріалу в просторі  $e_i = f(\eta)$  для різних обтисків при редукуванні заготовок.

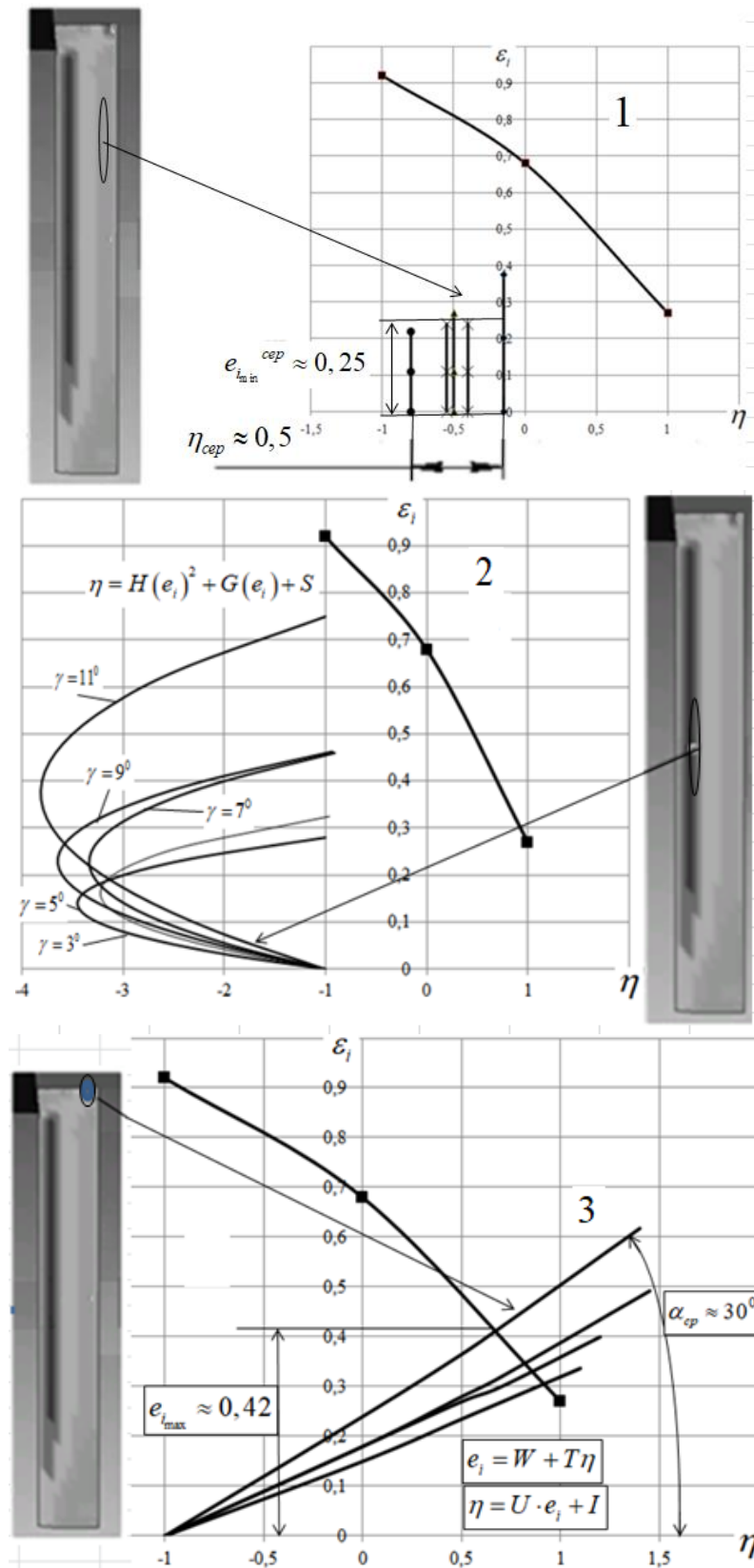


Рисунок 8 – Шляхи деформування для фіксованого натягу заготовок із сплаву W-Ni-Fe при різних значеннях кута нахилу матриці



Використання феноменологічних критеріїв для розрахунку використаного ресурсу пластичності заготовок в процесі редукування з різними технологічними параметрами не має визначених вимог, щодо меж використання того чи іншого критерія деформування. Водночас, характерною особливістю процесу редукування являється те, що для типових ділянок деформованої заготовки властиві різні види шляхів деформування. Тому, для визначення ресурсу в процесі редукування, необхідно застосовувати різні деформаційні критерії, вибір яких обумовлений нами в статті [5].

Для зони 1 (рис. 8) характерним є просте навантаження, тому розрахунок використаного ресурсу пластичності здійснюється, використовуючи критерій Смірнова-Аляєва Г. А. (1).

Для зони 2 (рис. 8) характерне складне навантаження з суттєвою кривиною шляхів деформування та нелінійним накопиченням пошкоджень, тому розрахунок використаного ресурсу пластичності здійснено, використовуючи критерій (2)

Для зони 3 (рис. 8) характерне складне деформування з малою кривиною шляху деформування, тому розрахунок використаного ресурсу пластичності здійснено, використовуючи критерій В.Л. Колмогорова

Підбір потрібних параметрів процесу також можна здійснювати за допомогою формули подібної до (1):  $\psi = \frac{e_i(\delta, \gamma)}{e_p(\eta_k)\omega} \leq 1$ , де  $\omega$  – коефіцієнт впливу історії деформування на шляхи деформування точок заготовки (рис. 9).

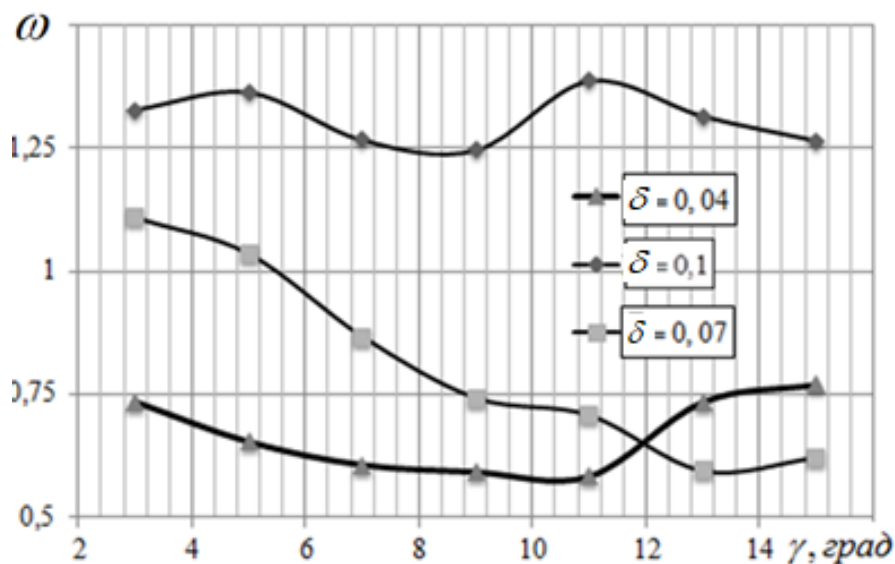


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта  $\omega$  від кута нахилу матриці

Для отримання інженерної залежності виразимо діаметр калібруючого отвору матриці за допомогою формули (13), отримаємо:

$$d \geq \frac{D}{\exp \left[ \frac{e_p^{(\eta=1)} e_p^{(\eta=0)} \exp(-\eta)}{e_p^{(\eta=1)} + \eta \left[ e_p^{(\eta=1)} - 2,72 e_p^{(\eta=0)} \right]} \right]} \cdot \frac{m}{2\omega} \quad (13)$$

У вказаній формулі враховані механічні властивості матеріалу (діаграма пластичності  $e_p = f(\eta)$ ; історія деформування, вплив якої врахований у вигляді коефіцієнта  $\omega$ ; вплив нерівномірності деформацій враховано у вигляді коефіцієнта нерівномірності деформацій  $m$ ).

Експериментальні дослідження деформаційного зміцнення зразків та впровадження отриманих результатів здійснено в рамках договору співпраці між ВНТУ та Інститутом Надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України. Реалізація досліджуваного процесу здійснена на обладнанні зображеному на рисунку 10.

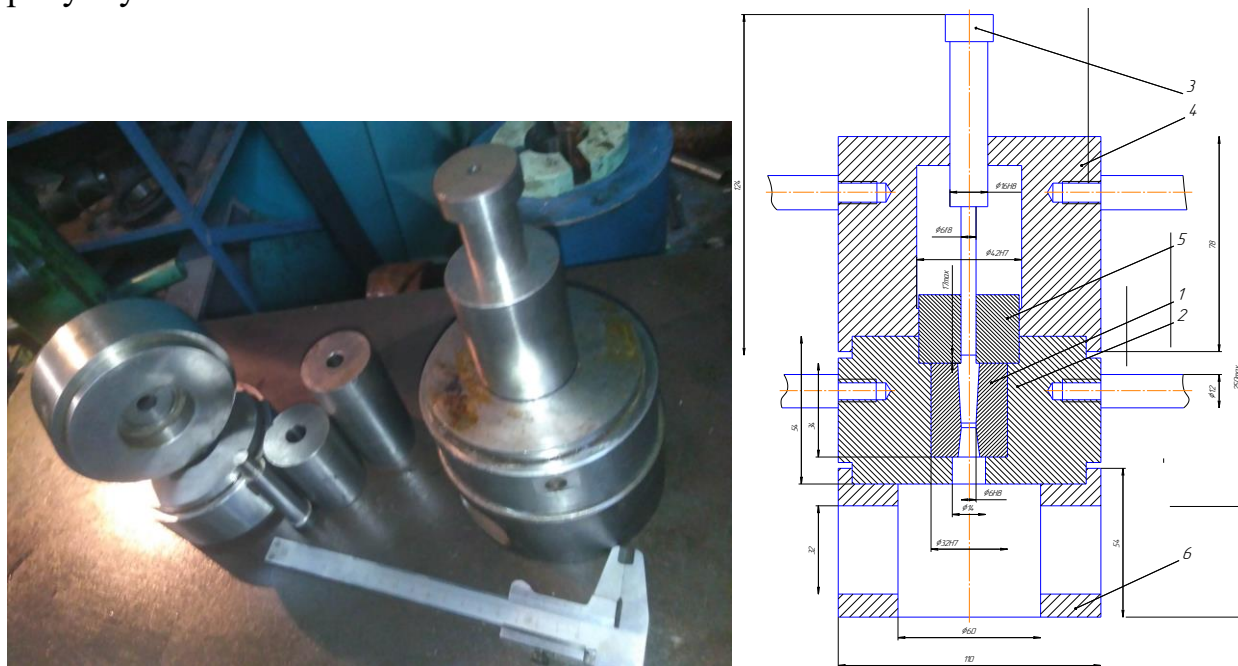


Рисунок 10 – Пристрій та схема пристрою для редукування зразків зі сплаву типу W-Ni-Fe

Рівень деформацій проредукованих зразків перевірявся шляхом визначення твердості перерізу зразка по Вікерсу (рис. 11)

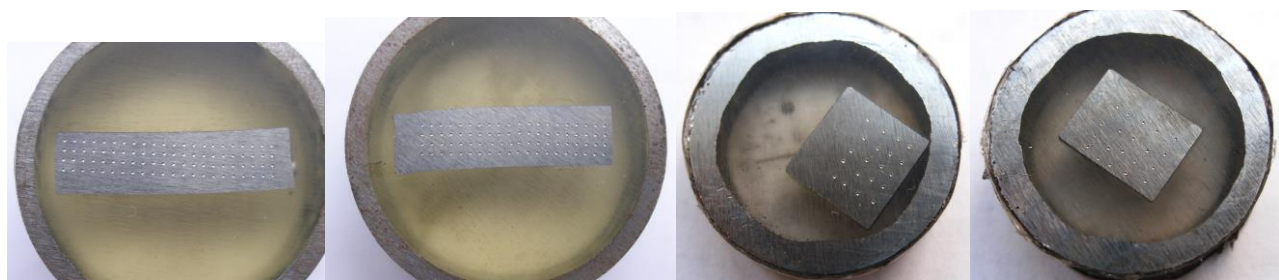


Рисунок 11 – Дослідження твердості. Шліфи

Для забезпечення максимальної інтенсивності деформацій в виробничому процесі використано матриці з кутом нахилу робочого конуса  $\gamma=4^\circ$ , досягнута інтенсивність деформацій рівна  $\epsilon_i=0,34$ .

## ВИСНОВКИ

В роботі здійснено дослідження та вдосконалення процесу редукування (пресування) коротких циліндричних заготовок з відносною довжиною (до діаметра) 2..5 з метою отримання необхідних механічних властивостей заготовок, зокрема виробів з порошкових сплавів системи W-Ni-Fe, а також встановлення технологічних режимів, що забезпечують безвідмовне формоутворення.

1) На підставі проведеного літературного аналізу встановлено шляхи і проблеми розвитку обробки тиском циліндричних заготовок редукуванням. Визначено напрями роботи, що спрямовані на забезпечення властивостей матеріалу після обробки редукуванням.

2) Сформовано карту сплаву системи W-Ni-Fe (W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%), яка містить такі складові:

- криву течії (зміцнення), апроксимовану степеневу функцією  $\sigma_i = 1709e_i^{0,259}$ , яку слід використовувати для здійснення процесів холодного пластичного деформування, зокрема моделювання методом скінченних елементів, а також розрахунків енергосилових параметрів таких процесів;

- діаграму пластичності в координатах  $e_p = f(\eta)$ , що в області  $\eta \leq 0$  апроксимована функцією  $e_p(\eta) = 0,69 \cdot \exp(-0,3 \cdot \eta)$ , в області  $\eta > 0$  апроксимована  $e_p(\eta) = 0,69 \cdot \exp(-1,75 \cdot \eta)$ . Коефіцієнти чутливості пластичності  $\lambda_1 = 1,75$  та  $\lambda_2 = 0,3$  вказують, що в області  $\eta \leq 0$  матеріал має незначну чутливість щодо пластичності зі зміною схеми напруженого стану, а в області  $\eta > 0$  - навпаки. Тому обробку цього матеріалу слід проводити в умовах за яких  $\eta < 0$ , при цьому враховувати, що значне збільшення гідростатичного тиску не суттєво підвищує пластичність ;

- тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень  $\sigma_i$  – інтенсивність деформацій  $e_i$ , залежність твердості HV від інтенсивності напружень  $\sigma_i$  практично лінійна, при цьому твердість зростає в 1,35 рази при зростанні напруження текучості в 2,7 рази, зв'язок твердості HV від інтенсивності деформацій  $e_i$  має степеневу залежність, тарувальні графіки є основою для експериментальної оцінки технологічної спадковості під час проектування технологічного процесу.

3) На основі розрахункової моделі методом скінченних елементів здійснено аналіз напружено-деформованого стану, який дозволив встановити параметри процесу редукування (обтиск, кут нахилу матриці, коефіцієнт тертя) та особливості його механіки з точки зору нерівномірності деформацій, шляхів деформування, контактних напружень:

- при фіксованому куті нахилу інструменту та збільшенні величини обтиску спостерігається збільшення нерівномірності деформацій, зокрема при фіксованому обтиску  $\delta = 0,04$  та  $\gamma = 13^\circ$  -  $m = 0,2$ , при  $\delta = 0,04$  та  $\gamma = 5^\circ$  -  $m = 0,5$ ;

- зменшення величини кута нахилу робочого конуса інструменту  $\gamma$  в процесі редукування спричиняє зростання коефіцієнта нерівномірності

деформацій  $m$ , зокрема для обтисків  $\delta=0,04$  зменшення кута  $\gamma$  з  $\gamma=13^0$  до  $\gamma=5^0$  супроводжується зростанням коефіцієнта нерівномірності від  $m=0,2$  до  $m=0,5$ ;

- збільшення обтиску  $\delta$  в процесі редукування спричиняє зростання коефіцієнта нерівномірності деформацій  $m$ , зокрема для  $\gamma=13^0$  збільшення обтиску з  $\delta=0,06$  до  $\delta=0,12$  супроводжується зростанням коефіцієнта нерівномірності від  $m=0,3$  до  $m=0,65$ ;

- встановлено небезпечні області з точки зору руйнування, які характеризуються несприятливими розтягуючими напруженнями (розташовані навколо вісі заготовки при виході з інструменту; а також шари заготовки, що лежать біля поверхні). Це дозволило, в подальшому, здійснити оцінку деформовності заготовки в процесі її обробки редукуванням;

- максимальне значення нормальних контактних напружень зі збільшенням обтиску  $\delta$  від 0,01 до 0,11 зростає від -125 МПа до -1200 МПа і більше, що є необхідною інформацією при виборі відповідних умов змащення для запобігання схоплювання та налипання металу заготовки на інструмент. В подальшому доцільним є вибору раціональної форми інструменту для підвищення його максимальної стійкості;

- отримані залежності з оцінки напружено-деформованого стану є основою для оцінки деформовності та технологічної спадковості. Розроблена методика перерахунку енергосилових параметрів та компонентів тензора напружень для матеріалів з подібною реологією, що розширює область застосування отриманих результатів при розрахунку технологічних параметрів процесу редукування відповідних заготовок для різноманітних конструкційних матеріалів.

4) Аналіз напружено-деформованого стану в процесі редукування, який представлено у вигляді шляхів деформування в координатах безрозмірні показники напруженого стану – накопичена інтенсивність деформацій показав, що в окремих ділянках заготовки реалізуються прості шляхи деформування  $\chi=0$ ,  $d\eta/ de_i = 0$ ,  $d^2\eta/ de_i^2=0$ , що дозволяє для оцінки використаного ресурсу пластичності використовувати прості деформаційні критерії, на основі яких розроблено інженерні залежності, які дозволяють визначити граничні значення технологічних параметрів ( $\delta$ ,  $\gamma$ ) в залежності від фізико-механічних властивостей матеріалів. Шляхи деформування в середині осередку деформування характеризуються значною кривизною  $d^2\eta/ de_i^2$  та досягає значень  $4 \geq d^2\eta/ de_i^2 \geq 0,5$ , а також величиною першої похідної  $12 \geq d\eta/ de_i \geq -12$ . У вказаній області реалізується об'ємний напружений стан, що викликало необхідність розрахунку використаного ресурсу пластичності за допомогою модифікованого критерію В. А. Огороднікова, який враховує вплив третього інваріанту тензора напружень та історію деформування.

5) Для сплаву системи W-Ni-Fe (W- 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%.) необхідні показники технологічної спадковості, що виражаються в величині твердості після деформування (HV=3400..4050 МПа), нерівномірності розподілу деформацій ( $m \geq 0,75$ ), середньому розмірі зерна деформованого сплаву 49,5..54,6 мкм, відносному видовженні після розриву та залишковій

пластичності менше 10%, що реалізується при таких технологічних параметрах:  $0,1 \geq \delta \geq 0,06$  та  $7^{\circ} \geq \gamma \geq 3^{\circ}$ .

б) Результати досліджень впроваджено в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля м. Київ у вигляді надання методик та рекомендацій щодо вдосконалення технологічного процесу та визначення його раціональних параметрів, що дає суттєве скорочення часу на технологічну підготовку (до 30%), зменшення кількості виробів з бракувальними ознаками і залежить від конкретних умов реалізації процесу (до 95%), а також в навчальний процес Вінницького національного технічного університету.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] O. V. Hrushko, O. V., Hutsalyuk, O. V., Andreev, I. V., Mel'nychenko and V. V., Studenets', «Mechanical Characteristics of Alloys of the W–Ni–Fe System», *Materials Science*. № 54(1), pp. 88-95, 2018.

[2] А. В. Грушко, Т. И. Молодецкая, О. В. Гуцалюк и Р. С. Ткаченко, «Деформированное состояние в условиях поперечного изгиба толстолистовой широкой заготовки», *Вісник НТУ «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. № 46(952), с. 204-212, 2012.

[3] В. А. Федотов, О. В. Гуцалюк и Р. С. Ткаченко, «Выбор критериев разрушения в задачах обработки металлов давлением», *Вісник ХНУ, Збірник наукових праць. Серія: Технічні науки*. №6(219), с. 20-26, 2014.

[4] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением», *Вісник НТУ «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. № 43(1086), с. 127-136, 2014.

[5] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «История деформирования, определяющая применение феноменологических критериев разрушения в процессах обработки давлением», *Науковий журнал «Вісник машинобудування та транспорту*. Выпуск 1, с. 67-77, 2015.

[6] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Модельовання процесу редукування циліндричних заготовок з визначенням основних параметрів деформованого стану», *Обработка материалов давлением*. № 1(42), с. 57-62, 2016.

[7] І. В. Андреев, О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк, В. В. Мельниченко та С. Ф. Студенець, «Механічні характеристики сплавів системи W-Ni-Fe», *Міжнародний науково-технічний журнал «Фізико-хімічна механіка матеріалів»*. № 1(54), с. 57-62, 2018.

[8] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Ю. О. Слободянюк «Спосіб відбору партій сталевий маловуглецевої катанки для волочіння дроту з прогнозованими механічними характеристиками», Пат.123757 Україна, МПК G01N 3/08, G01N 3/28 № и 2017 08508, Бюл. №5, заявл. 19.08.2017, опубл. 12.03.2018.

[9] В. А. Огородников та О. В. Гуцалюк «Параметри напруженого стану діаграм пластичності» на *XLI-й регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студ. університету з*

участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області. Вінниця, ВНТУ, 14 – 15 травня 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/inmt>.

[10] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Побудова діаграм руйнування в залежності від параметра напруженого стану, що враховує властивості металу» на *XLII-ій регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області*. Вінниця, ВНТУ, 21 – 22 березня 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2013/inmt>.

[11] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Р. С. Ткаченко, «Вплив історії деформування на пластичність», на Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції: Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи, 23 – 26 квітня 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=16&mat=105>.

[12] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Карта важкого сплаву системи вольфрам-нікель-залізо для процесів холодної обробки тиском» на *VI-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”*, м. Київ, 16-17 грудня 2015 - с.1 Режим доступу: <https://kpi.ua/15-12-14>.

[13] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання МКЕ процесу редукування циліндричних заготовок з важкого сплаву системи вольфрам-залізо-нікель» на *VII-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти” Київ-Херсон*, 30 травня – 03 червня, 2016, с.2.

[14] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання процесу редукування коротких циліндричних заготовок на основі сплаву системи вольфрам-нікель-залізо» на *Міжнародній інтернет конференції «Теоретичні і практичні проблеми теорії пластичності та обробки металів тиском»* Вінниця, 26 – 27 жовтня 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://omdconf.vntu.edu.ua/publish\\_ua.html](http://omdconf.vntu.edu.ua/publish_ua.html).

[15] О. В. Гуцалюк, «Деякі аспекти механіки редукування циліндричних заготовок із забезпеченням безвідмовного формоутворення» на *VIII-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”* Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 29 травня – 02 червня 2017, с.3 .

[16] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Г. А. Лічман, «Карта матеріалу ствола (сталь 38Х2МЮА)», на *XLVI-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту*, Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/3032>.

[17] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Деформовність коротких циліндричних заготовок в процесі їх редукування» на *XLVI-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту*,

Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/3038>.

[18] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання напруженого стану в процесах вісесиметричного пластичного деформування», на *X-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”* Київ-Херсон НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 3 – 7 червня 2019, 1 с. Режим доступу: <http://kntu.net.ua/ukr/Pro-universitet2/Novini-universitetu/H-Mizhnarodna-naukovo-tehnichna-konferenciya-Teoretichni-ta-praktichni-problemi-v-obrobci-materialiv-tiskom-i-yakosti-fahovoyi-osviti>.

[19] В. А. Огородников, М. И. Побережный и О. В. Гуцалюк, «Матрица для редуцирования сплавов W-Ni-Fe обеспечивающая снижение контактных напряжений и улучшение механических свойств изделия» на *1-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019»*, Вінниця, ВНТУ, 13 – 15 травня 2019, с.

[20] О. В. Гуцалюк, «Технологічні відмови в процесі редукування» на *XLVIII-ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту*, Вінниця, ВНТУ, 22 березня 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/index>.

## АНОТАЦІЯ

**Гуцалюк О. В. Вдосконалення процесу холодного редукування коротких циліндричних заготовок методами технологічної механіки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 „Процеси та машини обробки тиском”. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Дисертація спрямована на розв’язок важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесу холодного редукування шляхом надання рекомендацій щодо меж використання таких технологічних параметрів: кут нахилу робочого конуса матриці та відносний обтиск заготовки, на основі використання методів технологічної механіки з врахуванням використаного ресурсу пластичності.

Сформовано карту сплаву системи W-Ni-Fe (W- 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%), яка містить: криву течії, стандартні механічні характеристики, діаграму пластичності та градувальник графік твердість – напруження – деформації. Розроблено імітаційну модель процесу редукування. Здійснено аналіз напружено-деформованого стану, що дозволило встановити параметри процесу редукування (обтиск, кут нахилу матриці, коефіцієнт тертя) та особливості його механіки з точки зору нерівномірності деформацій, шляхів деформування, контактних напружень.

Обґрунтовано доцільність використання деформаційних критеріїв деформовності для визначення використаного ресурсу пластичності матеріалу

заготовки в характерних її ділянках, які описуються шляхами деформування різної кривини.

Отримано інженерну залежність, яка дозволяє розрахувати калібруючий діаметр матриці для одноциклового редукування, при якому забезпечується безвідмовне формоутворення.

Виконано теоретичні і експериментальні дослідження впливу кута нахилу інструменту та величини обтиснення на прогнозування технологічної спадковості.

**Ключові слова:** процеси холодного редукування, деформовність, пластична деформація, кривизна траєкторій деформацій, використаний ресурс пластичності, траєкторія навантаження, технологічна спадковість, сплав системи W-Ni-Fe.

## ABSTRACT

**Gutsaluk O. V. Improvement of the process of cold reduction of short cylindrical billets by the methods of technological mechanics. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript**

Dissertation for the degree of candidate of Science in Technical Science in the Specialty 05.03.05 „Processes and Machines of Plastic Working”. – Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, 2019.

The dissertation is aimed at solving the important scientific and technical problem of increasing the efficiency of the cold reduction process by providing recommendations on the limits of the use of the following technological parameters: the angle of inclination of the working cone of the matrix and the relative clamping of the workpiece, based on the use of methods of technological mechanics, taking into account the used plasticity resource.

A map of an alloy of the W-Ni-Fe system (W- 89%, Ni - 7.5%, Fe - 3.5%) was formed, which contains: flow curve, standard mechanical characteristics, plasticity diagram and a graph of hardness – stress – strain. A simulation model of the reduction process is developed. The analysis of the stress-strain state, which allowed to establish the parameters of the reduction process (compression, angle of the matrix, coefficient of friction) and features of its mechanics in terms of uneven deformations, deformation paths, contact stresses.

The expediency of using deformation criteria of deformability to determine the used material plasticity resource of the workpiece material in its characteristic areas, which are described by the ways of deformation of different curvature, is substantiated.

An engineering dependence was obtained, which allows to calculate the calibration diameter of a matrix for single-cycle reduction, which ensures trouble-free formation.

Theoretical and experimental studies of the influence of the angle of inclination of the tool and the magnitude of compression on the prediction of technological heredity have been performed.



**Keywords:** cold reduction processes, deformability, plastic deformation, curvature of deformation trajectories, used plasticity resource, load trajectory, technological heredity, alloy of the W-Ni-Fe.

## АННОТАЦИЯ

**Гуцалюк А. В. Совершенствование процесса холодного редуцирования коротких цилиндрических заготовок методами технологической механики. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической проблемы повышения эффективности процесса холодного редуцирования путем предоставления рекомендаций относительно угла наклона рабочего конуса матрицы и относительного обжатия заготовки на основе использования методов технологической механики. При этом использовалась феноменологическая теория деформируемости применительно к обработке заготовок с относительной длиной (к диаметру) 2..5 на основе порошковых сплавов системы W-Ni-Fe с обеспечением безотказного формообразования.

Сформирована карта сплава системы W-Ni-Fe (W- 89%, Ni - 7,5%, Fe - 3,5%), которая содержит кривую течения, стандартные механические характеристики, диаграмму пластичности и градуированный график твердость – напряжение – деформации. Разработана имитационная модель процесса редуцирования. Осуществлен анализ напряженно-деформированного состояния, что позволило установить параметры процесса редуцирования (обжим, угол наклона матрицы, коэффициент трения) и особенности его механики с точки зрения неравномерности деформаций, путей деформирования, контактных напряжений.

Анализ напряженно-деформированного состояния в процессе редуцирования, который представлен в виде путей деформирования в координатах безразмерные показатели напряженного состояния - накопленная интенсивность деформаций показал, что в отдельных участках заготовки реализуются простые пути деформирования. Это позволяет для оценки использованного ресурса пластичности использовать простейшие деформационные критерии, на основе которых разработаны инженерные зависимости для определения предельных значений технологических параметров в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Пути деформирования в приповерхностном очаге деформации характеризуются значительной кривизной. В указанной области реализуется объемное напряженное состояние, что вызвало необходимость расчета использованного ресурса пластичности с помощью модифицированного критерия В. А. Огородникова, учитывающий влияние третьего инварианта тензора напряжений и историю деформирования.

Обоснована целесообразность использования деформационных критериев деформируемости для определения использованного ресурса пластичности материала заготовки в характерных ее зонах с учетом кривизны путей деформирования. В частности, для путей деформирования малой кривизны разработан инженерный математический аппарат расчета использованного ресурса пластичности в характерных участках материала заготовки, подвергаемой холодному пластическому редуцированию. Таким образом, получена инженерная зависимость, позволяющая рассчитать очко матрицы для одноциклового редуцирования, при котором обеспечивается безотказное формообразование.

Показано, что характер распределения контактных напряжений может быть положен в основу разработки рациональной геометрии контура матрицы. При осесимметричном редуцировании для обеспечения уменьшения усилия деформирования и увеличения остаточного ресурса пластичности следует использовать матрицы на основе кривых второго порядка.

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования влияния угла наклона инструмента и величины обжатия на прогнозирование технологической наследственности.

Результаты исследований внедрены в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля (г. Киев) в виде предоставления методик и рекомендаций по совершенствованию технологического процесса и определения его рациональных параметров, что дает существенное сокращение времени на технологическую подготовку, уменьшение количества браковочных изделий. Также результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Винницкого национального технического университета.

**Ключевые слова:** процессы холодного редуцирования, деформируемость, пластическая деформация, кривизна траектории деформирования, использованный ресурс пластичности, траектория нагружения, технологическая наследственность.

Підписано до друку 06.11.2019 р. Формат 29,7×42¼  
Наклад 100 прим. Зам. №2019-150.  
Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому  
центрі Вінницького національного технічного університету  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.