

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Гапонова Оксана Петрівна

УДК 621.762.4

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ РЕЖИМІВ ШТАМПУВАННЯ
ПОРОШКОВИХ ПОРИСТИХ ЗАГОТОВОК ІЗ МІДНО-ТИТАНОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Луганськ – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Прикладне матеріалознавство» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (СНУ ім. В.Даля) Міністерства освіти та науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Рябічева Людмила Олександрівна, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Луганськ), завідувач кафедри «Прикладне матеріалознавство»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Баглюк Геннадій Анатолійович,
Інститут проблем матеріалознавства
Національної Академії Наук України (м. Київ),
начальник відділу зносостійких і корозійностійких порошкових конструкційних матеріалів

кандидат технічних наук, доцент
Стоянов Олександр Анатолійович,
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Луганськ), доцент кафедри «Обробки металів тиском і зварювання»

Захист відбудеться "4" грудня 2009 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 29.051.02 при Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля за адресою: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20-А.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля за адресою: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20-А.

Автореферат розісланий « 3 » листопада 2009 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 29.051.02, д.т.н., професор

Ю.І. Гутько

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У теперішніх умовах створення конкурентноздатної продукції машинобудування України пов'язане з удосконаленням технологій, що дозволяють отримати вироби високої якості при мінімальних матеріало- та енерговитратах. У зв'язку з цим зростає роль ресурсозберігаючих технологій обробки тиском, які за певних термомеханічних умов деформування дозволяють замінити виготовлення деталей механічною обробкою різанням і отримати вироби з регламентованими властивостями.

Для виготовлення деталей машин, що використовуються у вузлах тертя, електричних контактів, електродів та інших виробів електротехнічних пристроїв використовуються сплави на основі міді. В теперішній час отримали розвиток способи виготовлення таких деталей обробкою тиском порошкових заготовок. Порошкова композиція об'єднує властивості різних матеріалів. Застосування термомеханічних режимів штампування при виготовленні деталей з порошкового матеріалу дозволяє управляти їх структурою та отримувати задані властивості.

Відомо, що на формування структури та властивостей матеріалу впливають процеси динамічного знеміцнення, що відбуваються при виготовленні деталей в інтервалі підвищених температур. Процеси динамічного знеміцнення експериментально та теоретично досліджені при аналізі впливу температурно-швидкісних умов деформування на пластичну плинність компактних матеріалів. Отримані термомеханічні режими деформування заготовок при напівгарячому штампуванні успішно застосовуються для виготовлення деталей машинобудування.

В той же час недостатньо досліджена кінетика динамічного знеміцнення в порошкових пористих матеріалах при різних температурно-швидкісних умовах деформування, недостатньо вивчений вплив пористості на процеси знеміцнення твердої фази пористого тіла. Практично відсутні математичні моделі, що дозволяють взаємопов'язати параметри деформування та параметри структури і передбачити властивості матеріалу. При виготовленні деталей з порошкових матеріалів недостатньо використовуються технології, що ґрунтуються на урахуванні впливу параметрів деформування на структуру та властивості виробів. Вирішення таких питань пов'язане з проведенням експериментальних та теоретичних досліджень динамічного знеміцнення порошкових пористих матеріалів, розробкою математичних моделей, що взаємопов'язують параметри деформації та структури і створенням на їх основі термомеханічних режимів штампування порошкових пористих заготовок.

У зв'язку з вищевикладеним, тема дисертаційної роботи, яка присвячена аналізу впливу процесів динамічного знеміцнення при різних термомеханічних умовах штампування на параметри деформування та структуру порошкових матеріалів і вибору раціональних режимів штампування пористих заготовок, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку «Створення матеріалів зі спеціальними властивостями та технологій виготовлення виробів з них» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Робота виконана відповідно до держбюджетної теми «Створення фізико-механічної теорії теплового деформування порошкових композиційних матеріалів» (№ держреєстрації 0103U000424). Здобувач приймав участь в якості виконавця.

Мета та задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є удосконалення термомеханічних режимів штампування порошкових пористих мідно-титанових матеріалів на основі визначен-

ня закономірностей динамічних процесів знеміцнення, що забезпечують виготовлення виробів підвищеної якості з регламентованими фізико-механічними властивостями.

Для досягнення вказаної мети в роботі поставлені наступні задачі:

- виявити закономірності динамічних процесів знеміцнення при підвищених температурах і різних швидкостях деформації в порошкових пористих тілах; оцінити їх вплив на ущільнення, структуроутворення та дифузійні процеси в двокомпонентних системах;
- встановити взаємозв'язок ступеня деформації з пористістю при різних температурно-швидкісних умовах деформування пористої заготовки;
- оцінити механізми процесів динамічного знеміцнення твердої фази порошкової пористої заготовки з урахуванням накопиченої деформації та наявності фази пор;
- визначити закономірності дифузійних процесів на межі частинок мідь-титан і встановити вплив параметрів пластичної деформації на дифузію в порошкових пористих матеріалах;
- встановити взаємозв'язок параметрів деформації з розміром зерна для побудови діаграм рекристалізації;
- на основі експериментальних і теоретичних досліджень динамічних процесів знеміцнення та ущільнення порошкових пористих заготовок розробити та впровадити термомеханічні режими штампування при виготовленні обробкою тиском виробів з порошкових мідно-титанових матеріалів.

Об'єкт дослідження: термомеханічні режими штампування порошкових пористих заготовок при підвищених температурах і різних швидкостях деформації.

Предмет дослідження: процес деформування, динамічні процеси знеміцнення та структуроутворення в порошкових пористих матеріалах при різних термомеханічних умовах деформування, фізико-механічні й експлуатаційні властивості виробів.

Методи дослідження: експериментальне дослідження процесів динамічного знеміцнення при підвищених температурах і різних швидкостях деформації здійснювали деформуванням на одноосьове стискання; параметри структури визначали за допомогою металографічного аналізу; оцінку параметрів дифузії виконували за допомогою електронно-мікроскопічних досліджень; визначення механічних, фізичних й експлуатаційних властивостей порошкових мідно-титанових матеріалів виконано по стандартним методикам.

Для оцінки впливу ступеня деформації на пористість використані основні положення теорії пластичності пористих тіл; аналіз процесів динамічного знеміцнення виконаний на основі теорії пластичності та дислокаційних уявлень про пластичну деформацію твердої фази порошкового тіла; метод функцій Гріна використаний для вирішення одновимірного рівняння дифузії для порошкового пористого матеріалу; метод невизначених коефіцієнтів використаний для визначення залежності величини зерна від параметрів деформації. Вирішення задач виконане з використанням стандартних програм пакету MathCad 11. Статистична обробка результатів експериментів виконана по ГОСТ 8.207-76 з використанням прикладних програм STATISTICA 6 та MathCad 11.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше визначені закономірності динамічних процесів знеміцнення твердої фази порошкових пористих мідно-титанових матеріалів в інтервалі підвищених температур при різних швидкостях деформації, що характеризують зміну механізму динамічного знеміцнення при досягненні критичних ступенів деформації.

2. Отримало подальший розвиток математичне моделювання динамічних процесів зменшення твердої фази порошкових пористих мідно-титанових матеріалів на основі взаємопов'язування параметрів деформування та структурних характеристик матеріалу, у тому числі пористості, що дозволяє встановити механізм динамічних процесів зменшення.

3. Отримало подальший розвиток математичне моделювання процесу дифузії в порошкових пористих мідно-титанових матеріалах, що дозволяє оцінити вплив параметрів деформування на концентрацію компонентів в дифузійній зоні двокомпонентного порошкового матеріалу.

4. Вперше розроблена математична модель взаємозв'язку температури, ступеня та швидкості деформації з розміром зерна, що враховує вплив пористості на структуроутворення і дозволяє побудувати діаграми рекристалізації.

Практичне значення отриманих результатів. При розробці термомеханічних режимів штампування порошкових пористих заготовок рекомендовано використання встановлених закономірностей динамічних процесів зменшення для формування регламентованих фізико-механічних властивостей виробів машинобудування. Для розрахунку величини зерна, що забезпечує задані властивості виробів, рекомендується математична модель прогнозування параметрів структури з урахуванням температури, ступеня та швидкості деформації, а також початкової пористості.

Запропоновані термомеханічні режими штампування пористих заготовок з порошкових мідно-титанових матеріалів, що забезпечують отримання виробів із заданими фізико-механічними властивостями.

Рекомендований порошковий матеріал на основі міді з масовим вмістом титану 0,5% для виготовлення деталей електротехнічного призначення та запропонований термомеханічний режим штампування. Розроблений термомеханічний режим виготовлення деталі «ролик зварювальний» дозволив підвищити твердість виробу в 2 рази, межу міцності в 1,4 рази при збільшенні питомого електричного опору в межах допустимого. При цьому дугостійкість мідно-титанового матеріалу на 35% вище дугостійкості компактної міді марки М1. Розроблений термомеханічний режим і технологія виготовлення деталі «ролик зварювальний» впроваджена у виробництво ВАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе» з річним економічним ефектом 60700 грн. при програмі випуску 5000 штук.

Рекомендований порошковий антифрикційний матеріал на основі міді з масовим вмістом титану 2% для роботи у вузлах тертя. Матеріал застосований для виготовлення деталі «втулка з буртом». Відмітними особливостями матеріалу є підвищені механічні властивості (межа міцності 320-350 МПа, твердість 120-150 НВ) та низька інтенсивність зношування ($1,65 \cdot 10^{-14}$ мкм/км). Розроблений термомеханічний режим і технологія виготовлення деталі «втулка з буртом» впроваджена у виробництво ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш» з річним економічним ефектом 24000 грн. при програмі випуску 10000 штук.

Основні результати роботи використані в учбовому процесі при викладанні дисциплін напряму «Інженерне матеріалознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля і Сумського державного університету.

Особистий внесок здобувача. Розроблені установки для експериментальних досліджень, виконані теоретичні й експериментальні дослідження одноосьового стискання, виконано дослідження фізико-механічних властивостей, проведена статистична обробка експериментальних да-

них. Розроблені термомеханічні режими деформування порошкових пористих заготовок при виготовленні деталей електротехнічного та конструкційного призначення.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та результати досліджень доповідалися і обговорювалися на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (2007-2009 рр.); на міжнародній науково-технічній конференції «Прогрессивные технологии пластической деформации металлов» (2008, м. Донецьк, Україна); на 5-й міжнародній конференції з порошкової металургії (2008, Ankara, Turkey); на міжнародній конференції «DFPM 2008» (2008, Stará Lesná, Slovak Republic); IX науково-технічній конференції молодих фахівців ВАТ «АМК» (2008, м. Алчевськ, Луганської обл., Україна); на IV Євразійській науково-практичній конференції «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-2008 (2008, м. Москва, Росія); на міжнародній науково-технічній конференції «Достижения и перспективы развития процессов и машин обработки давлением в металлургии и машиностроении» (2009, м. Краматорськ, Донецької обл., Україна); на міжнародній науково-технічній конференції «Университетская наука 2009» (2009, м. Маріуполь, Донецької обл., Україна), на 2-й міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування» (2009, м. Луцьк, Україна); «Бернштейновских чтениях по термомеханической обработке металлических материалов» (2009, м. Москва, Росія); на засіданні розширеного науково-технічного семінару факультету прикладної механіки і матеріалознавства Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (2009, м. Луганськ, Україна).

Публікації. Основні результати виконаних досліджень опубліковані в 16 друкованих роботах, з них 9 в збірках наукових робіт і журналах, що входять до переліку спеціалізованих видань ВАК України, та 1 патенті.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг роботи 249 сторінок машинописного тексту, зокрема основного тексту 153 сторінок, 68 рисунків, 23 таблиці, 5 додатків і список використаних джерел з 252 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і завдання дослідження, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача, результати апробації і впровадження.

У **першому розділі** приведені сучасні уявлення про процеси динамічного знеміцнення в порошкових матеріалах. Представлена загальна характеристика електротехнічних і антифрикційних порошкових матеріалів на основі міді. Виконаний загальний аналіз впливу температури, ступеня та швидкості деформації на кінетику динамічного знеміцнення компактних і порошкових матеріалів, розглянуті математичні моделі динамічного знеміцнення. Показано вплив пластичної деформації на дифузійну взаємодію в порошкових пористих матеріалах.

Розробці та удосконаленню теорії динамічного знеміцнення присвячені праці С.М. Sellars, М.І. Luton, J.J. Jonas, А.Д. Rollett, М.І. Бернштейна, С.С. Гореліка, Р.З. Власюка, В.І. Левіта та інших. У роботах Ю.Г. Дорофєєва, Г.А. Баглюка, І.Д. Радомисельського, С.Г. Напара-Волгіної, В.І. Трефілова, С.О. Фірстова, Т.Ф. Волинової, С.С. Єрмакова, І. Yasuhiro та інших відомих вче-

них досліджено вплив параметрів деформації на структуроутворення та формування фізико-механічних властивостей, що дозволило визначити раціональні режими деформування порошкових заготовок з матеріалів на основі заліза та міді. На основі виконаного аналізу встановлено, що недостатньо вивчені закономірності динамічного знеміцнення порошкових матеріалів і вплив пористості на структуроутворення твердої фази.

На підставі аналізу літературних даних сформульовані мета і завдання дослідження.

У **другому розділі** виконаний вибір напрямку і методів дослідження. В якості матеріалів для дослідження використані порошкові матеріали на основі міді, леговані титаном. В якості основної складової композиції використовували порошок стабілізований мідний марки ПМС-1 ГОСТ 4960-75, легування титаном здійснювали шляхом добавки у шихту 0,5 і 2% по масі порошку марки ВТ1-0 ОСТ 1.90013-81. Запропонована технологія виготовлення пористих зразків для деформації на одноосьове стискання.

Циліндричні зразки пористістю 5 і 10% отримували двостороннім пресуванням на гідравлічному пресі моделі ПД-476 зусиллям 1600 кН. Спінання здійснювали у середовищі генераторного газу по ступеневому режиму. Одноосьове стискання виконували на випробувальній машині ZD – 4. Швидкість деформації складала $0,01 \text{ с}^{-1}$ та $0,001 \text{ с}^{-1}$. Випробування виконували в температурному інтервалі 20, 100-700°C, з кроком 100°C до відносного ступеня деформації 60%.

Після деформації досліджували структуру, хімічний склад дифузійної зони на межі частинок титана та міді, фізико-механічні властивості зразків.

Для теоретичних досліджень впливу параметрів деформації на параметри структуроутворення порошкових матеріалів вибрані математичні методи аналізу.

Статистична обробка результатів експериментальних досліджень виконана згідно ГОСТ 8.207-76 з використанням пакетів прикладних програм MathCAD 11, OriginPro 8 та Microsoft Excel.

У **третьому розділі** представлені експериментальні дослідження одноосьового стискання порошкових мідно-титанових заготовок в інтервалі підвищених температур і швидкостей деформації. Основна увага приділена дослідженню процесів знеміцнення та їх впливу на напруження плинності, процес ущільнення і структуроутворення.

Аналіз пластичного деформування пористих зразків в інтервалі підвищених температур виконаний по кривим плинності. Відмічено, що величина напруження плинності зменшується з підвищенням температури в результаті динамічного знеміцнення твердої фази. В результаті деформації при 400°C зміцнення твердої фази зростає внаслідок деформаційного старіння порошкових мідно-титанових матеріалів. З підвищенням швидкості деформації величина напруження плинності збільшується у зв'язку з більш активним зміцненням твердої фази і неповним протіканням динамічних процесів знеміцнення.

На величину напруження плинності чинить вплив пористість, зі збільшенням якої напруження плинності зменшується. З підвищенням початкової пористості зразків змінюється характер кривої плинності. Порівняльний аналіз залежності напруження – деформація компактних, безпористих і пористих порошкових зразків показав, що збільшення ступеня деформації призводить до зменшення інтенсивності зміцнення компактних зразків, тоді як у порошкових напруження плинності зростає (рис. 1). Для кривих плинності компактних матеріалів характерна наявність максимуму напруження, а потім стадії сталої плинності, чого не спостерігається на кривих плинності пористих матеріалів внаслідок структурної деформації. Наявність пористості стримує знеміцнення твердої фази.

Рис. 1. Криві плинності при осадці, $t=600^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0,001\text{ c}^{-1}$ (1, 2, 4):

1 – безпористий зразок з 0,5% Ti; 2 – $\theta_0=5\%$, Ti=0,5%;

3 – компактний сплав Cu+0,5%Ti, $\dot{\varepsilon}=0,0045\text{ c}^{-1}$; 4 – мідь компактна

Аналіз кривих плинності в логарифмічних координатах $\Delta\sigma - \varepsilon_z$ (рис. 2) дозволив визначити критичні ступені деформації, що відповідають зміні механізму знеміцнення: при ступенях деформації менше 0,013-0,092 знеміцнення здійснюється за рахунок динамічного повернення, в інтервалі від 0,013-0,092 до 0,045-0,25 – за рахунок динамічної полігонізації, а при ступенях деформації вище 0,045-0,25 механізмом знеміцнення є динамічна рекристалізація. Встановлено, що при $\theta_0=10\%$ необхідний більший ступінь деформації для початку рекристалізації, оскільки пористість уповільнює процеси знеміцнення.

а

б

Рис. 2. Залежність $\Delta\sigma - \varepsilon_z$: 0,5% Ti; $\theta_0=5\%$; $\dot{\varepsilon}=0,001\text{ c}^{-1}$ (а); $\dot{\varepsilon}=0,01\text{ c}^{-1}$ (б):

1 – 20°C , 2 – 100°C , 3 – 400°C , 4 – 300°C , 5 – 500°C , 6 – 600°C , 7 – 700°C

Одноосьове стискання супроводжується ущільненням. Інтенсивність процесу ущільнення досліджували шляхом побудови залежностей $\ln\theta_0/\theta - \varepsilon_z$ (рис. 3). Показано, що при ступенях деформації менше 0,22-0,36 пористість зменшується внаслідок структурної деформації. Зі збільшенням ступеня деформації зростає вплив пластичної деформації твердої фази на ущільнення, причому з підвищенням температури та швидкості деформації цей процес інтенсифікується внаслідок підвищення пластичності за рахунок динамічного знеміцнення твердої фази. Встановлено, що інтенсивність ущільнення зменшується зі зростанням вихідної пористості зразка. Це обумовлено формозміною пор і перетворенням відкритої пористості в закриту.

Встановлений вплив параметрів деформації на структуру. Зі збільшенням ступеня деформації зерно міді подрібнюється і тим інтенсивніше, чим вище ступінь і швидкість деформації. При температурі динамічного повернення 100°C подрібнення зерна є наслідком деформації твердої фази, при температурах вище 400°C – динамічної рекристалізації. В результаті динамічної рекристалізації при 600°C розмір зерна міді складає 3-4 мкм. Пластична деформація супроводжується подрібненням частинок титану та зменшенням розмірів пор до 11-19 мкм і 3-6 мкм відповідно.

а

б

Рис. 3. Залежність істинного питомого ущільнення від ступеня деформації:

0,5% Ti, $\dot{\varepsilon}=0,001\text{ c}^{-1}$; а – $\theta_0=5\%$; б – $\theta_0=10\%$:

○ – 100°C ; ◇ – 300°C ; + – 400°C ; × – 500°C ; Δ – 600°C ; □ – 700°C

Показано, що пластична деформація сприяє інтенсифікації дифузійної взаємодії компонентів, причому з підвищенням температури і швидкості деформації концентрація міді і титану в ди-

фузійній зоні збільшується. При температурі деформації 600°C концентрація міді на межі мідь-титан складає 67,74-69,54% і 65,40-67,38% відповідно при початковій пористості 5% і 10%. Збільшення початкової пористості зразків призводить до зменшення концентрації компонентів в дифузійній зоні, оскільки наявність фази пор сприяє зменшенню потоку дифундувальних атомів за рахунок порушення контактів між частинками порошкового пористого матеріалу.

Четвертий розділ присвячений оцінці впливу параметрів деформації на ущільнення порошкових пористих тіл, аналізу механізмів знеміцнення і процесів дифузії в порошкових пористих тілах при деформуванні в інтервалі підвищених температур, а також розробці математичної моделі взаємозв'язку параметрів деформації та структури при різних термомеханічних умовах деформування.

Виконаний теоретичний аналіз процесу ущільнення з використанням макромеханічного підходу, що ґрунтується на аналізі елементарної комірки ізотропного пористого тіла при вільній осадці пористого зразка в умовах однорідного напруженого стану і відсутності зовнішнього тертя.

Для знаходження залежності пористості θ від осевого ступеня деформації ε_z спочатку аналізували поле швидкостей деформацій. В результаті математичних перетворень отримали основне співвідношення математичної моделі:

$$\frac{d\theta}{d\varepsilon_z} = (\bar{k} - 1)\theta, \quad (1)$$

де \bar{k} – коефіцієнт, залежний від стану твердої фази.

В результаті інтегрування рівняння (1) з урахуванням того, що в момент, коли пористість дорівнює своєму початковому значенню, осева деформація дорівнює нулю, отримана залежність пористості від осевого ступеня деформації:

$$\theta = \theta_0 \exp(\bar{k} - 1)\varepsilon_z. \quad (2)$$

Показано, що математична модель підтверджує затухаючий характер зміни пористості зі зростанням ступеня деформації. При малих ступенях деформації ущільнення інтенсифікується внаслідок структурної деформації. Зі збільшенням деформації ущільнення уповільнюється, оскільки зменшення пористості здійснюється за рахунок пластичної деформації твердої фази. Залежність пористості від ступеня деформації виражена величиною коефіцієнта, що знаходиться в залежності від коефіцієнта Пуассона, котрий характеризує радіальну деформацію при одноосьовому стисканні. Показано, що математична модель враховує вплив початкової пористості та параметрів деформації на ущільнення. Відхилення розрахункових значень пористості від експериментальних не перевищує 7-10%.

Аналіз механізмів динамічного знеміцнення ґрунтується на положенні про зміну дислокаційної структури твердої фази порошкового матеріалу в процесі пластичної деформації при підвищених температурах. Зміну щільності дислокацій при деформації описували рівнянням:

$$\dot{\rho} = \eta\dot{\varepsilon} - k\rho, \quad (3)$$

де ρ – щільність дислокацій;

k – функція Больцмана, що пов'язана з енергією активації знеміцнення;

$\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації;

η – коефіцієнт, що описує здатність матеріалу твердої фази до накопичення дислокацій при певній швидкості деформації.

При постійній швидкості деформації $\dot{\varepsilon}(t) = \zeta = const$ і крайових умовах $\rho(0) = \rho_0$ отримано рішення рівняння (3):

$$\rho = \left(\rho_0 - \frac{\eta \zeta}{k} \right) \exp\left(-k \frac{\omega}{\zeta} \right) + \frac{\eta \zeta}{k}, \quad (4)$$

де ω – накопичена деформація, що залежить від функцій пористості та стану твердої фази.

Накопичена деформація твердої фази з урахуванням термічно активовуваних процесів знеміцнення після логарифмування описується виразом:

$$\ln \omega_k = \ln \frac{\zeta}{k_0} + \frac{E}{kT}, \quad (5)$$

а максимальне напруження плинності:

$$\ln \sigma_z = \ln \left[A \left(\chi \frac{\eta \zeta}{k_0} \right)^n \right] + \frac{nE}{kT}, \quad (6)$$

де χ – коефіцієнт, що знаходиться в межах $0 < \chi < 1$;

A і n – постійні;

k_0 – частотний чинник, що не залежить від температури;

T – абсолютна температура.

По енергії активації встановлено, що в температурному інтервалі 100-300°C механізмом знеміцнення є динамічне повернення та полігонізація, оскільки її значення мінімальні і складають 0,30-0,39 еВ при пористості 5% та 0,23-0,28 еВ при пористості 10% (рис. 4). В температурному інтервалі 500-700°C знеміцнення здійснюється за рахунок динамічної рекристалізації, енергія активації дорівнює 2,33-2,60 еВ та 1,96-2,30 еВ при пористості 5 і 10% відповідно. Показано, що енергія активації динамічного знеміцнення порошкових матеріалів менше, ніж компактних, що свідчить про стримуючий вплив пористості на процес знеміцнення.

а

б

Рис. 4. Зміна енергії активації при знеміцненні, $T_i=0,5\%$:

а – низькотемпературна гілка; б – високотемпературна гілка; \blacktriangle, Δ – $\theta_0=5\%$, відповідно $\dot{\varepsilon}=0,01 \text{ c}^{-1}$ і $\dot{\varepsilon}=0,001 \text{ c}^{-1}$; \bullet, \circ – $\theta_0=10\%$, $\dot{\varepsilon}=0,01 \text{ c}^{-1}$ і $\dot{\varepsilon}=0,001 \text{ c}^{-1}$

Для аналізу впливу параметрів деформації на кінетику дифузійних процесів використовували рівняння другого закону Фіка:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (7)$$

де C – концентрація компонента;

x і τ – координата і час відповідно;

D – коефіцієнт дифузії.

Рішення диференціального рівняння другого порядку в частинних похідних виконували методом функцій Гріна, який полягає в знаходженні функції Гріна та перевірки законності диференціювання під знаком інтеграла необхідну кількість разів.

Початкові і граничні умови мають вигляд:

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= C_0 = \text{const}, & -\infty \leq x \leq 0 \\ C(x, 0) &= 0, & 0 < x \leq \infty \end{aligned} \quad (8)$$

В результаті математичних перетворень отримане аналітичне рішення рівняння дифузії (7) за умов (8):

$$C(x, \tau) = \frac{C_0}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D\tau}} \right) \right], \quad (9)$$

де $\operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D\tau}} \right)$ – функція помилок Гауса.

Визначені коефіцієнти дифузії міді та титану. Показано, що на параметр дифузії здійснюють вплив температурно-швидкісні умови деформації, причому з підвищенням температури і швидкості деформації коефіцієнти дифузії збільшуються. При пористості 10% коефіцієнти дифузії як міді, так і титану приймають меншу величину, оскільки наявність фази пор перешкоджає перенесенню дифундувальної речовини.

Порівняльний аналіз концентрацій дифундувальних компонентів в дифузійній зоні, отриманих розрахунковим методом, показав, що їх величини змінюються подібно до експериментальних, залежно від температури, швидкості деформації, хімічного складу та пористості, що свідчить про адекватне відображення умов деформації і структури порошкового матеріалу в математичній моделі. Результати моделювання розподілу концентрацій компонентів відповідають експериментальним даним з похибкою 5-10%.

Математична модель, що зв'язує параметри деформації з величиною зерна і враховує вплив пористості, ґрунтується на співвідношенні Холла-Петча – залежності напруження плинності від розміру зерна. Встановлено, що зміцнення твердої фази здійснюється за рахунок трьох механізмів – внутрішньозеренного, твердорозчинного та зернограничного. Для мідно-титанових матеріалів ця залежність представлена виразом, що враховує внесок кожного з них:

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + A\omega^{\frac{3}{2}} + \left(B\omega^{\frac{1}{2}} + \Omega \right) D_{cp}^{-\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

де $\sigma_{0,2}$ – межа плинності матеріалу;

D_{cp} – середній розмір зерна;

A , B , Ω – коефіцієнти твердорозчинного, внутрішньозеренного та зернограничного зміцнення, відповідно.

З рівняння (10) після знаходження коефіцієнтів методом невизначених коефіцієнтів отриманий аналітичний вираз для визначення величини зерна в залежності від параметрів деформації і структури:

$$D_{cp}(t, \varepsilon_z, \dot{\varepsilon}_i, D_{12}, D_{21}, \tau, D_{cp}^0, R_{cp}^0, c_2, \theta, \omega) = \left[\frac{E_1 \exp(F_1 t) \cdot E_2 \exp(F_2 \varepsilon_z) \cdot E_3 \exp(F_3 \dot{\varepsilon}_i) \omega^{\frac{1}{2}} + A_1 \exp\left(\frac{B_1}{t}\right) \cdot A_2 \exp(B_2 \varepsilon_z) \cdot A_3 \exp(B_3 \dot{\varepsilon}_i) \cdot A_4 (D_{cp}^0)^{B_4}}{\sigma_z - \sigma_{0,2} - C_1 \exp(D_1 t) \cdot C_2 \exp(D_2 c_2) \cdot C_3 \frac{C_{01}}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{D_{cp}^0}{2\sqrt{4D_{12}\tau}}\right) \right] \cdot D_3 \frac{C_{02}}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{C_4(\varepsilon_z)^{D_4}}{2\sqrt{4D_{21}\tau}}\right) \right] \cdot C_5 \exp(D_5 \theta) \omega^{\frac{3}{2}}} \right]^2, \quad (11)$$

де t – температура деформації;

D_{12} – коефіцієнт дифузії металевої основи в легуючий елемент;

D_{21} – коефіцієнт дифузії легуючого елемента в металеву основу;

D_{cp}^0 – початкова величина зерна металевої основи;

R_{cp}^0 – початковий розмір частинок легуючого елемента;

c_2 – зміст легуючого елемента;

$A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, E_1, E_2, E_3, F_1, F_2, F_3$ – коефіцієнти апроксимації;

Для визначення величини зерна по формулі (11) на кожному кроці розрахунку застосовували один з наборів коефіцієнтів в залежності від параметрів деформації. Рішення задачі виконано з використанням стандартних програм пакету MathCad 11. Показано, що діаграми рекристалізації, отримані на основі рівняння (11), відображають процес формування структури при різних умовах деформації та пористості (рис. 5).

а

б

Рис. 5. Діаграми рекристалізації, 0,5% Ti, $\theta_0=5\%$:

а – $\dot{\varepsilon}=0,01 \text{ c}^{-1}$; б – $\dot{\varepsilon}=0,001 \text{ c}^{-1}$: \square – 100°C; Δ – 400°C; \circ – 600°C

Подібно до експериментальних даних зі збільшенням ступеня деформації розмір зерна зменшується, причому при температурі динамічної рекристалізації 600°C інтенсивніше, ніж в умовах зменшення динамічним поверненням при 100°C. Модель враховує вплив пористості на структу-

роутворення. Виконаний порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних діаграм рекристалізації. Відносна похибка склала 7-15%.

У **п'ятому розділі** представлені термомеханічні режими виготовлення деталей «ролик зварювальний» з мідно-титанового матеріалу з 0,5% титану та «втулка з буртом» підшипника ковзання з матеріалу з 2% титану. Показаний розрахунок силових параметрів деформування та приведена штампова оснастка для виготовлення деталей. Відмічено, що застосування розроблених технологічних процесів дозволяє при виготовленні 50 штук деталей «ролик зварювальний» економити 45,4 кг міді; при виготовленні деталей «втулка з буртом» – 12 кг. За результатами механічних випробувань і визначення фізичних властивостей показано, що термомеханічні режими виготовлення забезпечують отримання властивостей деталей, що регламентуються кресленнями. Технологічний процес виготовлення деталі «ролик зварювальний» впроваджений у виробництво ВАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе» та деталі «втулка з буртом» у ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш».

ВИСНОВКИ

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача удосконалення термомеханічних режимів штампування порошкових пористих заготовок з урахуванням динамічного знеміцнення на основі експериментального дослідження одноосьового стискання при підвищених температурах і різних швидкостях деформації та теоретичного аналізу процесів знеміцнення.

1. Аналіз сучасного стану теоретичних і експериментальних досліджень динамічного знеміцнення при здійсненні операцій обробки тиском порошкових пористих заготовок показав, що за рахунок зміни температурно-швидкісних умов деформації можливе управління процесом структуроутворення матеріалу, причому наявність фази пор здійснює вплив на кінетику процесів знеміцнення.

2. Отримані експериментальні дані по кінетиці динамічного знеміцнення твердої фази порошкової пористої заготовки з мідно-титанових матеріалів при різних температурно-швидкісних умовах одноосьового стискання. Подібно компактним матеріалам підвищення швидкості деформації від 0,001 до 0,01 с⁻¹ приводить до інтенсифікації процесів знеміцнення. Зростання температури деформації від 100 до 700°C забезпечує зниження напружень внаслідок розвитку процесів динамічного знеміцнення. На відміну від компактних матеріалів в інтервалі ступенів деформації від 0,002 до 0,916 на кривих плинності не спостерігаються максимальні напруження, що відповідають критичним ступеням деформації, які характеризують зміну механізму динамічного знеміцнення.

3. Шляхом побудови кривих плинності в логарифмічних координатах встановлені критичні ступені деформації, що характеризують зміну механізму динамічного знеміцнення твердої фази пористого матеріалу. Отримано, що механізмом динамічного знеміцнення при ступенях деформації менше 0,013-0,092 є динамічне повернення, в інтервалі ступенів деформації від 0,013-0,092 до 0,045-0,25 – динамічна полігонізація, а при ступенях деформації вище 0,045-0,25 – динамічна рекристалізація.

4. Встановлено, що динамічні процеси знеміцнення твердої фази забезпечують підвищення пластичності і, як наслідок, ущільнення, інтенсивність якого зростає з підвищенням температури та швидкості деформації. Коефіцієнт інтенсивності ущільнення, отже, інтенсивність структурної

деформації зменшується зі зростанням ступеня деформації та початкової пористості та збільшується з підвищенням температури і швидкості деформації.

5. Визначено зміну характеристик структури внаслідок розвитку динамічних процесів знеміцнення при різних температурно-швидкісних умовах деформації. За умов динамічного повернення величина зерна міді складає 10,6-15,5 мкм. Динамічна рекристалізація забезпечує отримання зерна міді до 3-5 мкм. Розміри частинок титану та пор складають 11-19 мкм і 3-6 мкм відповідно.

6. Встановлений вплив параметрів пластичної деформації на процеси дифузії в порошкових пористих матеріалах. В результаті деформації при підвищених температурах концентрація компонентів в дифузійній зоні, отриманої після спікання, зростає. При температурі 600°C концентрація міді в дифузійній зоні при початковій пористості 5 і 10% складає 67,74-69,54% і 65,40-67,38% відповідно. Нижча концентрація дифундувального компонента при пористості 10% є наслідком менших контактів між частинками порошкового пористого тіла. Підвищення швидкості деформації сприяє збільшенню концентрації міді та титану в дифузійній зоні.

7. З використанням мікромеханічного підходу отриманий аналітичний вираз залежності поточної пористості від осьового ступеня деформації. Використаний уточнений коефіцієнт інтенсивності ущільнення, що знаходиться в математичній залежності від коефіцієнта Пуассона, та враховує умови деформації, початкову пористість і структурні показники. Зміна цього коефіцієнта зі зростанням ступеня деформації свідчить про зменшення інтенсивності структурної деформації та розвиток динамічних процесів знеміцнення твердої фази, що забезпечує підвищення її пластичності. Відхилення розрахункових значень пористості при різних умовах деформації від експериментальних не перевищує 7-10%.

8. Отримані рівняння, що зв'язують основні параметри деформації та структурні характеристики матеріалу і дозволяють встановити механізм динамічних знеміцнюючих процесів. Встановлено, що в низькотемпературному інтервалі деформування 100-300°C енергія активації при пористості 5% складає 0,30-0,39 еВ, при пористості 10% – 0,23-0,28 еВ; у високотемпературному інтервалі 2,33-2,60 еВ і 1,96-2,30 еВ при пористості 5 і 10% відповідно. Величина енергії активації підтверджує експериментально отримані дані про механізми знеміцнення твердої фази порошкового матеріалу. Наявність фази пор чинить стримуючий вплив на процес знеміцнення.

9. З використанням методу функцій Гріна отримано аналітичне рішення одновимірного рівняння дифузії для порошкового пористого матеріалу, що дозволяє прогнозувати розподіл концентрації дифундувальної речовини по ширині дифузійної зони залежно від тривалості деформації при підвищених температурах. Визначені коефіцієнти дифузії компонентів: міді $2\text{-}3 \cdot 10^{-10}$ см²/с і титану – $10 \cdot 10^{-11}$ см²/с. Показано, що вони є чутливими до температури та швидкості деформації, хімічного складу та пористості. Результати моделювання розподілу концентрацій компонентів в дифузійній зоні відповідають експериментальним даним з похибкою 5-10%.

10. Розроблена математична модель, що зв'язує параметри деформації (температуру, ступінь і швидкість деформації) з розміром зерна і враховує вплив пористості на структуроутворення. На підставі представлення співвідношення Холла-Петча функцією багатьох змінних методом невизначених коефіцієнтів отримана залежність, що враховує вплив кожного чинника на процес структуроутворення. Побудовані діаграми рекристалізації порошкових мідно-титанових матеріалів пористістю 5 і 10%. Розрахункові дані величини зерна відповідають експериментальним даним з відносною похибкою 7-15%.

11. Розроблений термомеханічний режим виготовлення деталі «ролик зварювальний» з порошкового мідно-титанового матеріалу з масовим вмістом титану 0,5%, який полягає в холодному пресуванні заготовки пористістю 15%, спіканні при температурі 900-920°C і подальшому штампуванні при 600°C до щільності 8,86 г/см³. Застосування такого режиму дозволило отримати властивості, що регламентуються кресленням деталі: межа міцності 270 МПа, твердість 90-100 НВ, електричний опір 0,021 Ом·мм²/м. Технологічний процес впроваджений у виробництво ВАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе». Річний економічний ефект склав 60700 грн. при програмі випуску 5000 штук.

12. Розроблений термомеханічний режим виготовлення деталі «втулка з буртом» з порошкового мідно-титанового матеріалу з масовим вмістом титану 2%, котрий полягає в холодному пресуванні заготовки пористістю 15%, спіканні при температурі 900-920°C, штампуванні при 100°C до відносної щільності 0,97-0,98, видавлюванні при 600°C тіла втулки. Отримані властивості деталей, що регламентуються кресленням: межа міцності 320-350 МПа, твердість 120-150 НВ, інтенсивність зношування $1,65 \cdot 10^{-14}$ мкм/км, щільність 8,73 г/см³. Технологічний процес впроваджений у виробництво ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш». Річний економічний ефект склав 24000 грн. при програмі випуску 10000 штук

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гапонова О.П. Закономерности формирования структуры и свойств порошковых медно-титановых материалов при спекании / О.П. Гапонова, Л.А. Рябичева // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту. – 2008. – № 6 (124), Ч.1. – С. 116-119.

2. Рябичева Л.А. Исследование свободной осадки порошковых медно-титановых материалов / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. – Донецьк, ДонНТУ. – 2008. – Вип. 10 (141). – С. 236-240.

3. Gaponova O. Deforming of the copper-titanium powder materials at elevated temperatures / O. Gaponova, L. Ryabicheva // International Conference Deformation and fracture in structural pm materials DF PM 2008 Proceedings. – Stará Lesná, High Tatras, Slovak Republic. – 2008. – P. 196-199.

4. Ryabicheva L. Mathematical modeling of an interrelationship of properties of the porous body and material of hard phase / L. Ryabicheva, M. Shtern, D. Usatyuk, O. Gaponova // 5th International Powder Metallurgy Conference Proceedings. – Ankara, Turkey. – 2008. – Vol. 2. – P. 231-236.

5. Гапонова О.П. Влияние условий деформации на уплотнение порошковых медно-титановых материалов при повышенных температурах / О.П. Гапонова, Л.А. Рябичева // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки матеріалів у машинобудуванні. – Луганськ: Вид.-во СНУ. ім В.Даля. – 2008. – С.38-43.

6. Рябичева Л.А. Применение теории пластичности пористых тел к анализу связи пористости с осевой деформацией при свободной осадке / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту. – 2008. – №8 (126), Ч.2. – С. 21-27.

7. Гапонова О.П. Анализ механизмов динамического разупрочнения порошковых пористых материалов / О.П. Гапонова, Л.А. Рябичева // Вісн. Сумського державного ун-ту. Серія Технічні науки. – 2009. – №1. – С. 113-118.

8. Рябичева Л.А. Взаимосвязь параметров пластического деформирования и структурообразования в порошковых пористых телах / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // *Обработка материалов давлением: Сб. науч. тр.* – Краматорск: 2009. – №1 (20). – С. 193-198.
9. Рябичева Л.О. Оцінка параметрів дифузії при деформуванні порошкових пористих тіл / Л.О. Рябичева, О.П. Гапонова // *Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки».* – Луцьк: 2009. – №25. – Ч. 1. – С. 311-315.
10. Рябичева Л.А. Влияние температуры и скорости деформации на процессы диффузии в порошковой системе медь-титан / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // *Вісн. Східноукр. націон. ун-ту.* – 2009. – № 11 (141), Ч. 2. – С. 14-18.
11. Гапонова О.П. Выбор рациональных режимов формоизменения порошковых заготовок с учетом параметров структурообразования [Электронный ресурс] / О.П. Гапонова // *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту. ім. В. Даля* – 2009. – №6 Е – режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Vsunud/2009-6E/09gopups.htm>
12. Пат. 31433 Україна, МПК В 22 F3/10. Піч для нагрівання заготовок / Рябичева Л.О., Циркін А.Т., Скляр О.П., Гапонова О.П., Гончаров М.В.; заявник та патентовласник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. - №200713235; заявл. 28.11.2007; опубл. 10.04.2008, Бюл. №7.
13. Гапонова О.П. Динамические процессы разупрочнения порошковых медно-титановых материалов / О.П. Гапонова, Л.А. Рябичева // *Прочность неоднородных структур ПРОСТ-2008: IV Евразийская научно-практическая конференция, 8-10 апр. 2008 г.: тезисы докл.* – Москва: МИСиС, 2008 – С. 89.
14. Рябичева Л.А. Структура и свойства порошковых стареющих сплавов на основе меди / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // *IX-я науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «АМК», 22 мая 2008 г.: тезисы докл.* – Алчевск, 2008. – С. 13.
15. Гапонова О.П. Влияние пластической деформации при повышенных температурах на параметры диффузии в порошковых пористых системах // *Университетская наука-2009: междунар. науч.-техн. конф., 19-21 мая 2009 г.: тезисы докл.* – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – С. 141.
16. Рябичева Л.А. Динамическое разупрочнение пористых порошковых материалов при различных температурно-скоростных условиях деформирования / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // *Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2009): междунар. науч.-техн. конф., 3-4 июня. 2009 г.: тезисы докл.* – Санкт-Петербург, 2009. – С. 244-246.
17. Рябичева Л.А. Динамические процессы разупрочнения в порошковых пористых материалах / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // *Бернштейновские Чтения по термомеханической обработке металлических материалов: междунар. науч.-техн. конф., 3-4 окт. 2009 г.: тезисы докл.* – Москва: МИСиС, 2009. – С. 47.

Особистий внесок здобувача в опублікованих у співавторстві роботах:

[1] – виконаний експеримент по аналізу впливу спікання на властивості та структуру порошкових заготовок;

[2], [3], [5], [10], [13], [14] – проведені експериментальні дослідження, виконаний аналіз впливу основних параметрів деформування та пористості на пластичну плинність, ущільнення,

структуру та дифузійні процеси порошкових матеріалів при деформації за схемою одноосьового стискування;

[4], [6], [7], [8], [9], [16], [17] – розроблені моделі процесу ущільнення порошкових тіл; отримані вирази для визначення енергії активації динамічного знеміцнення; проведений теоретичний аналіз процесів дифузії в порошкових матеріалах;

[12] – розрахована піч для нагрівання пресовок із порошкових матеріалів.

АНОТАЦІЯ

Гапонова О.П. Удосконалення термомеханічних режимів штампування порошкових пористих заготовок із мідно-титанових матеріалів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском. – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Луганськ, 2009.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі удосконалення термомеханічних режимів деформування порошкових пористих заготовок на основі визначення закономірностей динамічних процесів знеміцнення, що забезпечують виготовлення виробів підвищеної якості з регламентованими фізико-механічними властивостями.

Розроблена технологія виготовлення пористих зразків для деформації одноосьовим стискуванням при підвищених температурах. Досліджений вплив температури, швидкості та ступеня деформації на пластичну плинність пористих тіл. Оцінений вплив пористості на зміну напруження плинності. Показано, що пористість чинить вплив на характер кривої плинності. Визначені критичні напруження і ступені деформації, що відповідають зміні механізму знеміцнення. Визначений вплив механізмів знеміцнення на інтенсивність ущільнення. Приведений аналіз впливу параметрів деформування на структуру – розмір зерна міді, пор і частинок титану. Показаний вплив пластичної деформації на дифузійну взаємодію компонентів порошкового матеріалу. Виконаний теоретичний аналіз процесу ущільнення; розроблена математична модель динамічного знеміцнення твердої фази порошкового тіла, яка дозволяє оцінити по величині енергії активації механізм динамічного знеміцнення з урахуванням накопиченої деформації та наявності фази пор; отримана модель, що описує дифузію в порошковому матеріалі; розроблена модель, що дозволяє оцінити розмір зерна з урахуванням параметрів деформації та пористості. Розроблені термомеханічні режими виготовлення деталей «ролик зварювальний» і «втулка з буртом» підшипника ковзання. Технології виготовлення впроваджені у виробництво ВАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе» та ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш».

Ключові слова: пористе тіло, підвищена температура, одноосьове стискування, пористість, динамічне знеміцнення, енергія активації, дифузія, розмір зерна, накопичена деформація, термомеханічний режим.

АННОТАЦИЯ

Гапонова О.П. Совершенствование термомеханических режимов штамповки порошковых пористых заготовок из медно-титановых материалов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением. – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, 2009.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи совершенствования термомеханических режимов деформирования порошковых пористых заготовок на основе определения закономерностей динамических процессов разупрочнения, обеспечивающих изготовление изделий повышенного качества с регламентированными физико-механическими свойствами.

Разработана технология изготовления пористых образцов для деформации одноосным сжатием при повышенных температурах. Исследовано влияние температуры, скорости и степени деформации на пластическое течение пористых тел. Оценено влияние пористости на изменение напряжения течения. Показано, что пористость оказывает влияние на характер кривой течения. Определены критические напряжения и степени деформации, соответствующие изменению механизма разупрочнения. Определено влияние механизмов разупрочнения на интенсивность уплотнения. Приведен анализ влияния параметров деформирования на структуру – размер зерна меди, пор и частиц титана. Показано влияние пластической деформации на диффузионное взаимодействие компонентов порошкового материала. Выполнен теоретический анализ процесса уплотнения; разработана математическая модель динамического разупрочнения твердой фазы порошкового тела, которая позволяет оценить по величине энергии активации механизм динамического разупрочнения с учетом накопленной деформации и наличия фазы пор; получена модель, описывающая диффузию в порошковой материале; разработана модель, позволяющая оценить размер зерна с учетом параметров деформации и пористости. Разработаны термомеханические режимы изготовления деталей «ролик сварочный» и «втулка с буртом» подшипника скольжения. Технологии изготовления деталей внедрены в производство ОАО «Сумское машиностроительное научно-производственное объединение им. М.В. Фрунзе» и ОАО «Сумский завод «Насосэнергомаш».

Ключевые слова: пористое тело, повышенная температура, одноосное сжатие, пористость, динамическое разупрочнение, энергия активации, диффузия, размер зерна, накопленная деформация, термомеханический режим.

ABSTRACT

Gaponova O.P. Improvement the thermomechanical regimes of stamping of powder porous billets from copper-titanium materials. - The manuscript.

The dissertation as the manuscript on competition of a scientific degree of Candidate of Technical Sciences on the speciality 05.03.05 - processes and machines for pressure shaping. East-Ukrainian Volodymir Dal National University, Lugansk, 2009.

The dissertation is devoted to solving of actual scientific and technical task of enhancement the thermomechanical regimes of deforming of powder porous billets based on defining the regularities of dynamic softening processes that ensure production of high-quality details with regulated physico-mechanical properties.

The technology for manufacturing of porous samples for deformation by uniaxial compression at elevated temperatures has been developed. The influence of temperature, strain rate and degree of deformation on plastic flow of porous bodies has been investigated. The impact of porosity to changing of flow

stress has been evaluated. It has shown that porosity makes an influence on character of flow curve. The critical stresses and degrees of deformation corresponding with changing of softening mechanism have been determined. The influence of softening mechanisms on the densification intensity has been determined. The analysis of impact of deforming parameters on structure has been provided – copper grain diameter, size of pores and titanium particles. An influence of plastic deformation on diffusion interaction of components of powder material has been shown. The theoretical analysis of densification process has been conducted. The mathematical model of dynamic softening of hard phase of powder body that allowing to estimate a dynamic softening mechanism by activation energy value accounting accumulated deformation and presence of pores phase has been developed. The model that describes diffusion into powder material has been obtained. The model that allows to estimate grain size with accounting deformation parameters and porosity has been developed. The thermomechanical regimes for production of details «welding roller» and «flange sleeve» of slide bearing have been developed. The production technologies of details have been implemented into production cycle of JSC «Sumy Frunze Machine-Building Science and Production Association» and JSC «Sumy plant NasosEnergMash».

Key words: porous body, elevated temperature, uniaxial compression, porosity, dynamic softening, activation energy, diffusion, grain size, accumulated deformation, thermomechanical regime.

АВТОРЕФЕРАТ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ РЕЖИМІВ ШТАМПУВАННЯ ПОРОШКОВИХ ПОРИСТИХ ЗАГОТОВОК ІЗ МІДНО-ТИТАНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Гапонова Оксана Петрівна

Підписано до друку 30.10.09 Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір офсетний.
Гарнітура Times. Друк офсетний. Умов. друк. арк. 1. Тираж 100 прим.
Видавн. № 2017. Зам. № 1017.

Видавництво

Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля
91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20 а

Дільниця оперативної поліграфії
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля
91034, М. Луганськ, кв. Молодіжний, 20 а

Адреса видавництва: 91034, М. Луганськ, кв. Молодіжний, 20 а

Телефон: (0642) 41-34-12. **Факс:** (0642) 41-31-60

E-mail: uni@snu.edu.ua **http:** <http://www.snu.edu.ua>