

Донецький національний технічний університет

Свяцький Володимир Вячеславович

УДК 621.775.8

**РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ І УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ  
ПРЕСУВАННЯ АДГЕЗИЙНО РОЗ'ЄДНАНИХ ВОЛОКОН ЗІ СВИНЦЕВИХ ГРАНУЛ**

Спеціальність: 05.03.05 – Процеси і машини обробки тиском

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

**Донецьк – 2004**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Кіровоградському державному технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Кіровоград.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Шепельський Микола Васильович**,  
Кіровоградський державний технічний  
університет, професор кафедри “Обробка металів тиском”.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Бейгельзімер Яків Юхимович**,  
Донецький національний технічний  
університет, професор кафедри “Обробка металів тиском”;

кандидат технічних наук, доцент,  
**Підлісний Сергій Володимирович**,  
Донбаська державна машинобудівна академія,  
зав. кафедрою “Технічна механіка”,  
м. Краматорськ.

**Провідна установа:** **Східноукраїнський національний  
університет** ім. В. Даля Міністерства освіти  
і науки України, м. Луганськ

Захист відбудеться “27” травня 2004 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої  
ради Д 11.052.01 Донецького національного технічного університету за адресою: 83000,  
м. Донецьк, вул. Артема, 58, 1-й навчальний корпус, ВАЗ.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донецького національного технічного  
університету за адресою: 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 2-й навчальний корпус.

Автореферат розісланий “26” квітня 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 11.052.01  
доктор технічних наук, професор

В.І. Алімов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Увага до проблеми пористих композиційних матеріалів в останнє десятиліття постійно зростає. Це пов'язано з тим, що інтенсивний розвиток народного господарства обумовлює створення нових матеріалів, що володіють комплексом спеціальних властивостей і які здатні забезпечити роботу конструкцій у жорстких експлуатаційних умовах. Висока механічна і жароміцність, термо- і корозійна стійкість, мала густина – далеко неповний перелік властивостей, якими володіють сучасні пористі композиційні матеріали. Однак складність одержання металевих волокон за допомогою традиційних технологій, наприклад, волочінням, екструзією розплаву, обмежують застосування пористих волокнистих матеріалів у промисловості.

З метою усунення цих недоліків у Кіровоградському державному технічному університеті був розроблений принципово новий, дешевий і ефективний технологічний процес одержання металевих волокон методом пресування литих гранул. Сутність способу полягає в тому, що гранули змішують з ізолюючим порошком, і суміш піддають екструзії. Порошок, який запобігає схоплюванню гранул при пресуванні, дозволяє деформуватися кожній гранулі окремо, у результаті чого гранули витягаються у вигляді досить ізольованих ниток. Однак однією з проблем при одержанні волокон за допомогою пресування литих гранул є нестійкість процесу одержання роз'єднаних волокон, яка викликана їхнім схоплюванням під час виходу з осередку деформації. З цієї позиції актуальною є задача дослідження реологічних особливостей на контакті деформованих гранул при їхньому пресуванні і, як наслідок, визначення умов одержання роз'єднаних волокон при виході їх з осередку деформації.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота виконана відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України №429 від 22.06.94 р. “Про реалізацію пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки” (напрямок 6 “Нові речовини та матеріали”, розділ 1 “Створення нових металевих, композиційних, керамічних матеріалів”), координаційного плану міжвузівських науково-дослідних робіт “Нові конструкційні матеріали та високоефективні технології їх виробництва” (розділ “Одержання нових пористих матеріалів з наперед заданими властивостями”) і науково-дослідної роботи “Дослідження та освоєння технологічних процесів одержання свинцевих волокон пресуванням литих гранул” (номер державної реєстрації 0103U008955) Кіровоградського державного технічного університету (здобувач брав участь у роботі як виконавець).

Мета роботи: на основі теоретичних досліджень адгезійних явищ на поверхнях контакту дискретних тіл при зсувних деформаціях і експериментів з використанням різних розділових середовищ встановити оптимальні режими деформації і найбільш ефективні параметри одержання розділених волокон у процесі пресування литих свинцевих гранул.

Для досягнення вказаної мети були поставлені та вирішені такі задачі:

- проведене аналітичне дослідження реології поверхні контакту адгезійно сумісних тіл при інтенсивних зсувних деформаціях;
- розроблена математична модель напруженого і деформованого станів на контакті дискретних тіл, які деформують;
- виявлені реологічні особливості поверхонь контакту деформованих гранул за допомогою металографічних досліджень;
- розроблена методика і проведені дослідження кількісної оцінки адгезійного зв'язку деформованих волокон у випресовці;
- вивчений вплив технологічних параметрів (режими деформації, вид розділових середовищ, робоча геометрія інструмента) на отримання роз'єднаних волокон у процесі пресування гранул;
- оптимізовані умови отримання роз'єднаних волокон зі свинцевих гранул;
- впроваджені результати дослідження у виробництво.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес отримання роз'єднаних металевих волокон за допомогою пресування литих гранул.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є вивчення реології на поверхні контакту при пресуванні дискретних тіл у режимі інтенсивних зсувних деформацій з різними розділовими середовищами.

Методи дослідження. Теоретичні й експериментальні дослідження, розробка практичних рекомендацій проведені на основі використання теорії пружності і пластичності, механіки суцільного середовища, теорії пресування дискретних тіл, реологічних положень механіки твердого тіла, яке деформують, методів статистичного аналізу експериментальних даних, засобів математичного моделювання процесів обробки металів тиском на персональних комп'ютерах.

### Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблена математична модель напруженого і деформованого станів на контакті дискретних тіл, які деформують при зсувних деформаціях, що зв'язує розміри системи “метал волокна – вторинна структура” з її фізико-механічними характеристиками і, тим самим, дозволяє прогнозувати реологічні прояви на границях металевих ниток у випресовці;
- вперше за допомогою дослідження кількісної оцінки адгезійного зв'язку деформованих волокон отриманий розподіл величини схоплювання дискретних ниток по перерізу волокнової випресовки;

– вперше на основі аналізу поля ліній ковзання сталої стадії пресування через симетричну одноочкову матрицю визначений оптимальний профіль матричної лійки, виконаний по лінії ковзання, що розділяє пружну і пластичну зону, яка забезпечує одержання роз’єднаних волокон;

– вперше візеопластичним методом встановлені поля відносних осьових і радіальних швидкостей переміщення гранул у процесі пресування волокон через різні профілі матричних лійок, визначені величини інтенсивностей швидкостей деформацій і, як наслідок, отримана оптимальна геометрія інструмента для пресування гранул на волокна;

– вперше на основі експериментальних досліджень пресування гранул на волокна, кількісної оцінки адгезійного зв’язку деформованих волокон, металографічних досліджень поверхні контакту деформованих часток визначене оптимальне розділове середовище (суспензія графіт-гліцерин) для гарантованого одержання роз’єднаних волокон у процесі пресування.

#### Практична цінність і реалізація результатів роботи.

Спроектовано пристрій для визначення адгезійного зв’язку частинок, які контактують, за кривими руйнування і пристрій для кількісної оцінки величини адгезійного зв’язку деформованих волокон. Розроблено пристрій для дослідження кінетики руху гранул у процесі пресування. Розроблено рекомендації, що вносять зміни в технологію одержання свинцевих волокон пресуванням литих гранул, яка раніше існувала, які стосуються вибору розділового середовища й оптимізації пресового оснащення. Внесені зміни дозволили знизити величину браку з 15% до 1...2% при виробництві металевих волокон і одержати при цьому економічний ефект 872 гривні на одну тону виготовлених ниток. Розроблено технологію виготовлення фільтруючих елементів зі свинцевих волокон, стендові випробування яких на БАТ “Гідросила” (м. Кіровоград) при очищенні відпрацьованих електродів для спільного знежирення-травлення і хромування показали, що вони відповідають вимогам ГОСТ 17108-86. Результати дисертаційної роботи (кількісна оцінка неоднорідності схоплювання деформованих ниток у випресовці, аналіз напруженого і деформованого станів при пресуванні, дослідження кінетики течії металу через різні профілі матричних лійок) використані в Кіровоградському державному технічному університеті в курсі “Теорія і проектування процесів обробки металів тиском”.

Особистий внесок здобувача. На основі огляду літератури автором було виконано теоретичне обґрунтування і здійснена постановка задачі дослідження. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві й особисто, автору належать: аналітичне дослідження реології поверхні контакту дискретних тіл при зсувних деформаціях; розробка математичної моделі напруженого і деформованого станів на контакті дискретних тіл, які деформують при зсувних деформаціях; коректування методики приготування металографічних шліфів з волокнових свинцевих зразків; розробка методики кількісної оцінки величини адгезійного зв’язку деформованих волокон; проведення досліджень на установках, розроблених особисто здобувачем;

аналіз і узагальнення результатів теоретичних і експериментальних даних; розробка практичних рекомендацій удосконалення технології пресування гранул на волокна, і участь у впровадженні в практику свинцевих волокнових фільтроелементів для очищення агресивних середовищ.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідалися на міжнародній конференції “Ресурсо- і енергосберегающие технологии в промышленности” (Одеса, 1996 р.), всеукраїнській конференції “Перспективні технології та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії” (Краматорськ, 2000 р.), міжнародній конференції “Высокие давления – 2000. Материаловедение и технологии” (Донецьк, 2000 р.), міжнародній конференції “Удосконалення процесів і обладнання виробництва та обробки металопродукції для металургії та машинобудування” (Краматорськ-Слов’янськ, 2000 р.), всеукраїнській конференції “Перспективні технології та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії” (Краматорськ, 2001 р.), міжнародній конференції “Проблеми конструювання, виробництва й експлуатації сільськогосподарської техніки” (Кіровоград, 2001 р.), міжнародній конференції “Автоматика та комп’ютерні технології в промисловості та АПК” (Кіровоград, 2002 р.), міжнародній конференції “Перспективні технології та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії” (Краматорськ, 2002 р.), міжнародній конференції “Машинобудування та металообробка” (- Кіровоград, 2003 р.), міжнародній конференції “Проблеми конструювання, виробництва й експлуатації сільськогосподарської техніки” (Кіровоград, 2003 р.), науково-практичних конференціях Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування (із грудня 1998 р. – Кіровоградський державний технічний університет) у 1995 – 2003 р.

Публікації. По темі дисертації опубліковано дев’ять статей у спеціалізованих виданнях ВАК України.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури і чотирьох додатків; текстовий матеріал викладений на 143 стор., таблиць – вісім, рисунків – 47, літературних джерел – 162 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність проведених досліджень, викладені мета і задачі роботи, а також шляхи їхнього вирішення, наукова новизна, практична цінність роботи, основні положення, які виносяться на захист, інформація про апробацію і публікації основних результатів роботи.

У першому розділі виконаний огляд сучасного стану розвитку волокнової металургії, існуючих методів одержання металевих волокон. Відмічено, що висока вартість вихідної сировини – волокон – обмежує застосування пористих волокнових матеріалів у промисловості. Запропоновано принципово новий, дешевий і ефективний технологічний процес одержання свинцевих волокон методом пресування литих гранул. Показано, що однією з проблем при

одержанні волокон з литих гранул є нестійкість процесу отримання роз'єднаних волокон, що викликана їхнім схоплюванням під час виходу з осередку деформації.

Істотний внесок у розвиток теорії та технології компактування сипучого металевго середовища, реологічних проявів на контакті дискретних тіл виконаний М.Б. Штерном, Я.Ю. Бейгельзімером, М.С. Ковальченком, М.В. Шепель-ським, А.Г. Косторновим, І.М. Лаптевим, С.В. Підлісним, В.Є. Перельманом, С.Г. Синковим, Л.О. Рябічевою, В.В. Скороходом, В.З. Спускаюком й іншими. Загалом на рівні деформацій структурних елементів вони узагальнили механізм ущільнення дискретного середовища. У той же час системні дослідження, спрямовані на вивчення умов пресування металевих волокон, реологічних проявів на контакті адгезійно-сумісних тіл, які деформують, і їхнього впливу на керування процесом одержання роз'єднаних волокон практично відсутні.

З цієї позиції поставлена задача дослідження реологічних особливостей на контакті деформованих гранул при їхньому пресуванні з використанням різних розділових середовищ, впливу геометрії осередку деформації на найбільш ефективні параметри одержання розділених волокон у процесі пресування литих гранул.

В другому розділі приведені методика й оснащення для пресування гранул на волокна, методики та пристрої для визначення величини адгезійного зв'язку дискретних частинок, які контактують при зсувних деформаціях, оснащення й методика візеопластичного методу дослідження кінетики течії гранул при пресуванні волокон.

Матеріалом для проведення досліджень служив свинець марки С2 ГОСТ 3778-77Е. Лиття гранул виконали на вібраційному пристрої (патент України №17942). Для одержання волокон за допомогою пресування використовували фракцію гранул від 4 до 5 мм. Для пресування гранул на волокна застосували прес-форму, змонтовану на пресі ПГ-452 силою 0,63 МН. Деформаційні умови дослідження: коефіцієнт витяжки  $\mu$  – від 21 до 81, кут заходу матриці  $\phi_3$  – від  $45^\circ$  до  $75^\circ$ . Пресування волокон виконали з використанням таких розділових середовищ: графіт дрібнозернистий міцний ТУ 48-20-51-84, окис цинку ОКП 26 1121 1081 05 ГОСТ 10262-73, карбонільне залізо Р-100Ф1 ГОСТ 13610-79, карбонільний нікель ПХН-ОТ1 ГОСТ 9722-79, ферит КМК-Б20 ГОСТ 13333-75, порошок кобальтовий ПК-1у ГОСТ 9721-79, а також використовували суспензії перерахованих вище речовин у технічному гліцерині.

Визначення величини адгезійного зв'язку виконали на спеціально розробленому пристрої за методикою та відповідно до вимог механічних випробувань металів на стиснення за ГОСТ 25.503-80. За зразки для випробувань використали циліндричні зразки, вирізані з випресовок (тип II за ГОСТ 25.503-80). Для кількісної оцінки адгезійного зв'язку деформованих волокон використали метод розривання порожнистих циліндрів поперек випресовки на спеціальному пристрої.

За регистрируючу апаратуру застосовували світлопроменевий осцилограф Н071.2, тензопідсилювач ТОПА3-3-02 і джерело струму АГАТ.

Металографічні дослідження виконали на мікроскопі МИМ-8М. Для фрактографічних досліджень використали дифрактометр ДРОН-2 з гоніометричною приставкою. Аналіз окисленої поверхні гранул виконали методом ОЖС-спектроскопії, дослідження мікробудови зламів виконали методом РЕМ.

У третьому розділі представлені результати аналітичного дослідження механіки деформування дискретних тіл з накладенням зсувних деформацій. Розглянуто реологію на контакті частинок, що деформують, проаналізований стан лінії розриву швидкостей у контактній області. Перетворюючи аналітичні висновки Є.М. Макушка прийнято, що частинка А, яку деформують, рухається відносно частинки В у осередку деформації зі швидкістю  $v_1$  і перетинаючи лінію поділу частинок, переходить на поверхню частинки В, змінюючи її швидкість на  $v_2$  (рис. 1). Оскільки відповідно до умови суцільності нормальний компонент швидкості повинен бути неперервний  $\overrightarrow{v_{n1}} = \overrightarrow{v_{n2}} = \overrightarrow{v_n}$ , то розрив перетерплює лише дотична складова  $v_\tau$ . При переході через лінію поділу її значення змінюється стрибком  $\overrightarrow{v_\tau} = \overrightarrow{v_{\tau2}} - \overrightarrow{v_{\tau1}}$ . Розрив дотичної складової швидкості спричиняє в необмежено тонкому шарі ( $\delta \rightarrow 0$ ) розділової області стан зсуву з інтенсивністю деформації зсуву  $G = \operatorname{tg} \gamma = \frac{v_\tau}{v_n}$ , тоді як швидкість зсувної деформації  $\eta$  та інтенсивність швидкості деформації зсувної  $H$ :

$$\eta = H = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{v_\tau}{\delta} \rightarrow \infty.$$

Дотичне напруження уздовж лінії поділу  $\tau = k$ , де  $k$  – опір контактного шару пластичному зсуву. Нормальні напруження при плоскому деформованому стані дорівнюють гідростатичному тиску  $p$  в елементі шару  $\sigma_n = \sigma_\tau = p$ .

Рис. 1. Схема границь розриву швидкостей при пресуванні дискретних тіл (частинки А і В).  $G$  – інтенсивність зсувних деформацій

Для прогнозування величини схоплювання поверхонь частинок, які контактують, використовували формулу розрахунку міцності з'єднання на зсув:

$$\tau = k_{34} \cdot \tau_s,$$

де  $k_{зч}$  – коефіцієнт міцності зчеплення поверхонь контактуючих волокон;

$\tau_s$  – межа текучості поверхні контакту дискретних ниток.

За результатами аналізу моделі схоплювання побудована графічна залежність коефіцієнта міцності зчеплення поверхонь деформованих ниток по перетину волокнувої випресовки (рис. 2) в умовах пресування гранул при витяжці  $\mu = 81$  і з кутом заходу матриці  $60^\circ$ .

Графічна залежність свідчить, що коефіцієнт міцності зчеплення поверхонь деформованих волокон зростає від центра прутка до його периферії, і на периферії при даній ступені витяжки досягає граничного значення – одиниці. Таким чином, для стійкого процесу одержання роз'єднаних волокон пресуванням гранул необхідно додатково вводити розділові середовища на поверхні контакту дискретних частинок, які деформують.

Рис.2. Залежність коефіцієнту міцності зчеплення поверхонь деформованих волокон по перетину волокнувої випресовки ( $r$  – радіус випресовки, мм)

З метою дослідження впливу різних середовищ на процес поділу волокон у залежності від деформаційних умов пресування проведені металографічні дослідження пресованих волокон і поверхні їх поділу.

З урахуванням складності процесів, що проходять при пресуванні гранул на волокна в умовах інтенсивних зсувів, відкоректована методика приготування мікрошліфів із волокнувих випресовок. Визначено оптимальний склад електроліту: 10 г гідроксиду натрію, 90 мл води. Параметри полірування: щільність струму – від 100 до 300 А/м<sup>2</sup>, напруга – від 3 до 5 В, температура – від 20 до 25 °С, час полірування – від 5 до 30 с, відстань між електродами – від 30 до 50 мм, катод – нержавіюча сталь. Травлення волокнувих свинцевих шліфів проводили в слабо дисоціюючому розчині Вілелла в складі: азотна кислота – від 9 до 25 мл, оцтова кислота – від 9 до 25 мл, технічний гліцерин – 100 мл. Час травлення складав від 30 с до 5 хвилин, температура травлення – від 40 до 80 °С. Після травлення виконували нейтралізацію розчину, який травить, десятипро-центним розчином КОН або NaOH.

Металографічні дослідження показали, що в процесі пресування зі збільшенням коефіцієнта витяжки  $\mu$  від 21 до 81 (при  $\varphi_3 = \text{const}$ ) інтенсивно проходить розвиток рельєфу поверхні волокон. Наприклад, при  $\mu = 81$  і  $\varphi_3 = 60^\circ$  орієнтація границь зерен (рис. 3, а) щодо поверхні контакту складає біля  $45^\circ$ , що свідчить про напрямком максимальних зсувних деформацій (уздовж лінії поділу волокон). Вплив кута заходу матриці  $\varphi_3$  (при зміні  $\varphi_3$  від  $45^\circ$  до  $75^\circ$  і  $\mu = \text{const}$ )

на вказані процеси незначний. Результати досліджень структури волокон, отриманих з різними розділовими фазами, показують, що введення таких розділових середовищ як графіт і окис цинку не дають якісного поділу волокон: лінія поділу слабо розвита і має місце впровадження зерен графіту в тіло волокна. Більш ефективно використання для цих середовищ технічного гліцерину як пов'язувальної речовини. Відзначено, що найбільше ефективно впливає на якість поділу волокон суспензія карбонільне залізо-гліцерин.

Вивчення текстури деформації проводили на зразках, випресованих без розділового середовища з різними степенями деформації. Зйомку виконували на дифрактометрі ДРОН-2 за допомогою гоніометричної приставки методом “на відображення”. Результати дослідження показали, що в загальному випадку процес текстуроутворення при пресуванні гранул не відрізняється від процесу текстуроутворення при пресуванні зливкового матеріалу. Зроблено висновок про те, що з ростом ступені деформації при пресуванні гранул без розділової фази відбувається схоплювання металу по контактним поверхням і формується класична текстура деформації металу з гранецентрованими ґратками. Значний вплив на розвиток механічної текстури чинить сильно окислена поверхня гранул (рис. 3, б). З розвитком механічною текстурою волокнувих випресовок пов'язані деякі особливості їхнього характеру руйнування. Дослідження мікробудови зламів методом РЕМ виявило наступні основні види руйнування випресовки: інтергранулярне (міжчасткове), міжзернинне (міжкрісталітне), усередині зерен (транскрісталітне). У зламах найчастіше спостерігаються змішані види руйнування. Це дає можливість припустити, що в'язке руйнування волокнувих випресовок відбувається не тільки по контактній поверхні волокон, але і по їхнім торцевим межах. Підтвердженням цього служить характер руйнування поперек випресовок, орієнтованих за напрямком деформації: мікрофрактограми виявили топографію руйнування по границі, імовірно, торця волокна. Причому в цьому випадку руйнування по контактній поверхні носить в'язкий характер – спостерігається велике число дрібних чашок (рис. 3, в).

Таким чином, при пресуванні гранул без розділових середовищ у вигляді досить малого адгезійного зв'язку металу по границях волокон, які контактують, руйнування виникає в першу чергу на цих поверхнях. При досягненні початковим надливом деякого розміру в сусідніх зонах виникає напружений стан, коли стає можливим утворення мікронадривів по границях зерен, субзерен та окісних частинок, тобто на ділянках, які представляють перешкоду для неперервності деформації. При подальшому навантаженні мікроспустощення зростають, і шляхом витягування зварених перемичок спочатку утворюють дрібні чашки, а потім поєднуючись в загальну поверхню – злам.

Рис. 3. Мікроструктури волокнувої випресовки: а – отриманої при  $\varphi_3 = 60^\circ$ ,  $\mu = 81$ ; б – фрактографія поверхні литої гранули; в – фрактограма руйнування уздовж випресовки

Вплив деформаційних умов пресування і виду розділового середовища на характер адгезійного зв'язку деформованих волокон оцінювали за допомогою механічних випробувань. Відзначено, що зразки, отримані за допомогою розділових середовищ у вигляді суспензій графіт-гліцерин і карбонільне залізо-гліцерин, при осаджуванні руйнувалися на окремі нитки. На рис. 4 показані залежності меж міцності волокнових зразків від виду розділового середовища.

Розділове середовище: 1 – без розділового середовища; 2 – окис цинку;  
3 – суспензія окис цинк-гліцерин;  
4 – графіт; 5 – суспензія порошок кобальт-гліцерин; 6 – суспензія карбонільний нікель-гліцерин; 7 – суспензія ферит-гліцерин; 8 – суспензія графіт-гліцерин; 9 – суспензія карбонільне залізо-гліцерин.

Рис. 4. Залежність меж міцності волокнових зразків від виду розділового середовища (при  $\mu = 81$ ,  $\varphi_3 = 60^\circ$ )

На основі даних статистичної обробки результатів механічних випробувань на розтягування отримані усереднені епюри адгезійного зв'язку поверхні контакту волокон по перетину зразків, відпресованих з різними розділовими середовищами (рис. 5).

Результати теоретичних і мета-логічних досліджень, механічних випробувань дозволили виділити з усіх розділових середовищ оптимальне – суспензію графіт-гліцерин, і оптимальне співвідношення пов'язівної речовини та гранульованого середовища для стійкого одержання дискретних ниток: від  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$  кг графіту та від  $0,4 \cdot 10^{-3}$  до  $0,6 \cdot 10^{-3}$  л гліцерину на 1 кг насипної ваги гранул.

Рис. 5. Залежність епюр величин адгезійного зв'язку деформованих волокон по перетині зразка від виду розділового середовища (1 – 7 див. рис. 4,  $r$  – радіус випресовки, мм)

У четвертому розділі приведені результати дослідження деформаційних режимів отримання роз'єднаних волокон при пресуванні гранул. Дослідження впливу геометрії осередку деформації на процес отримання роз'єднаних волокон показало, що напружений і деформований стан металу та розміри осередку деформації при пресуванні істотно залежать від профілю матричної лійки і величини калібруючого пояска матриці.

Для визначення впливу профілю матричної лійки і величини паска, що калібрує, на процес поділу волокон у процесі пресування прийняті такі типи профілів матричних лійок (рис. 6):

- опуклий профіль, побудований по експоненті, аргументований умовою сталості логарифмічної деформації на одиницю висоти матричної лійки;
- опуклий профіль, обгрунтований умовою забезпечення сталості усередненої швидкості деформації по висоті матричної лійки;
- матриця, форма якої відповідає усіченому конусу;
- увігнутий профіль, побудований по циклоїді виходячи з умови най-більшої рівномірності пластичної течії металу в матричній лійці;
- матриця, профіль якої виконаний по лінії ковзання, що відокремлює пластичну зону від пружної сталої стадії пресування.

Рис. 6. Поле ліній ковзання для сталої стадії пресування і профілі матричних лійок: 1 – перший опуклий логарифмічний; 2 – другий опуклий логарифмічний; 3 – конусний; 4 – увігнутий по циклоїді; 5 – увігнутий по лінії ковзання

Енергосилові параметри прямого пресування (питомі сили і роботи зсуву максимальних зсувних напружень) оцінювали за відомими залежностями Л.Г. Степанського. Результати розрахунків представлені на рис. 7. Аналіз результатів розрахунків і графічних залежностей (рис. 7) визначають однозначну перевагу увігнутих профілів матриць для одержання роз'єднаних волокон відносно інших профілів: крім низьких енергосилових параметрів в увігнутих матрицях відносні питомі роботи зсуву максимальних зсувних напружень збільшуються під час руху деформованих гранул до виходу з осередку деформації. При цьому профіль матриці, виконаний по лінії ковзання, що відокремлює пластичну зону від пружної, має переваги в порівнянні з профілем циклоїдної матриці.

Візіопластичним методом встановлені поля відносних осьових  $v_z/v_0$  і радіальних  $v_r/v_0$  швидкостей переміщення гранул, ізолінії яких для увігнутої лійки показані на рис. 8. Відзначено, що

розміри осередків деформації при різних формах матричних лійок приблизно однакові і визначаються загальною деформацією.

а)

б)

Рис. 7. Розподіл відносних питомих сил (а) і відносних питомих робіт зсуву максимальних зсувних напружень (б) по профілю матричних лійок (1 – 5 див. рис. 6)

Результати дослідження кінетики течії дискретного середовища показали, що форма матричної лійки впливає на розміри осередку деформації і розподіл результуючих деформацій у випресовці. З аналізу деформацій гранул впливає, що для увігнутої лійки, побудованої по лінії ковзання, характерне скривлення вісесиметричних частинок у напрямку деформації. Ці скривлення зменшуються під час руху гранул до вісі симетрії матриці.

Представлено розрахункові значення інтенсивностей швидкостей деформацій  $\dot{\epsilon}_i/v_0$  уздовж ліній течії  $l$ , розташованих на різних відстанях від осі симетрії, як визначника механічних властивостей металу виробів. Найбільша нерівномірність максимальних значень  $\dot{\epsilon}_i$  має місце для увігнутих лійок (рис. 9). Зроблено висновок про те, що такий перепад значень  $\dot{\epsilon}_i/v_0$  по перетину викликає істотну нерівномірність механічних властивостей ниток у волокновій випресовці. Менший перепад значень  $\dot{\epsilon}_i/v_0$  у перетинах характерний для конічних лійок, і практично відсутність нерівномірності показують опуклі лійки.

Рис. 8. Ізолінії рівних осьових  $v_z/v_0$  і радіальних  $v_r/v_0$  швидкостей увігнутої матричної лійки (цифри 0 – 11 відповідають лініям координатної сітки, рівновіддаленим однієї від іншої)

Рис. 9. Графіки зміни відносних інтенсивностей швидкостей деформації  $\dot{\epsilon}_i/v_0$  уздовж ліній струму для увігнутої матричної лійки (цифри 0 – 11 відповідають лініям координатної сітки, рівновіддаленим однієї від іншої)

При використанні моделі руйнування волокнових випресовок, отриманих на різних профілях матричних лійок, для кількісної оцінки немонотонності пластичної деформації був уведений декотрий кут  $\Phi$ , що характеризує поворот осей головних швидкостей подовження щодо матеріальної частки. Відзначено, що істотний ріст пластичності зв'язаний головним чином зі знакозмінним характером розвитку деформації, тобто з такою її течією, при якій головні осі роблять знакозмінний поворот у лагранжевій системі координат. Методом ліній ковзання за допомогою відомого рішення Р. Хілла визначали напружені стани випресовок (рис. 10). Потім знаходили

координати сітки ліній ковзання у фізичній площині, у площинах напружень і швидкостей. Кут, що характеризує немонотонність деформації, визначали як:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 ,$$

де  $\Phi_1$  – кут жорсткого повороту матеріальної частинки після її проходження чергової комірки, град.;  $\Phi_2$  – кут повороту головних осей тензора напружень відносно вісі пресування, град.

Для всіх матричних лійок (рис. 6) дослідженню по моделі руйнування піддавали лінії течії 11, тому що матеріальні частинки, рухаючись по цій траєкторії, проходять найбільший шлях. Результати розрахунків для ліній течії 11 представлені на рис. 11.

Виконані дослідження (рис. 7 – 11) дозволяють виділити з усіх матричних лійок увігнуту, виконану по лінії ковзання, що розділяє пружну і пластичну зону при пресуванні, яка забезпечує одержання роз'єднаних волокон.

Рис. 10. Сітка ліній ковзання і ліній течії для пресування волокон через увігнуту матричну лійку

Рис. 11. Напрямки кута  $\Phi$  уздовж траєкторії руху частинок (лінія течії 11) при пресуванні волокон через увігнуту (1), конічну (2) і опуклу (3) матричні лійки

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень розроблені рекомендації для внесення змін у технологію одержання свинцевих волокон пресуванням литих гранул, яка раніш існувала, що відносяться до вибору розділового середовища й оптимізації пресового інструмента. Удосконалення технології дозволило зменшити розмір браку з 15% до 1...2%, економічний ефект від зміни технології виробництва волокон склав 872 гривні на одну тону виготовлених ниток.

Проведено техніко-екологічне обґрунтування і розроблена технологія виготовлення металовокнових свинцевих фільтруючих елементів. Свинцеві фільтруючі елементи виготовляли за такою технологією. Гранули відливали в режимі: температура розплаву – від 400 до 420 °С; динамічна в'язкість охолоджувального середовища (розчину рідкого мила) – від 0,425 до 0,435 Па·с; амплітуда коливань диспергатора – від 3,5 до 4,0 мм; частота коливань диспергатора – від 2,0 до 2,5 мм. Після диспергування гранули просувували, промивали і відсівали за фракціями. Режим пресування: коефіцієнт витяжки  $\mu = 81$ ; профіль матричної лійки – увігнутий по лінії ковзання; параметр шорсткості поверхні матричної лійки –  $R_a$  від 1,6 до 3,2 мкм; висота робочого паска матриці  $h$  – від 0 до 1 мм; розділове середовище – суспензія графіт-гліцерин (з розрахунку від  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$  кг графіту і від  $0,4 \cdot 10^{-3}$  до  $0,6 \cdot 10^{-3}$  л гліцерину на 1 кг насипної ваги гранул). Після

нарізання волокон довжиною від 25 до 30 мм осадженням у гліцерині їх формували у вигляді металевої повсті в контейнері діаметром 90 мм із нержавіючої сталі. Виконували промивання повсті гасом, сушіння і потім ущільнювали його до заданої пористості (20, 30, 40, 50 і 60%).

При випробуваннях фільтроелементів на ВАТ “Гідросила” (м. Кіровоград) визначали характеристики структурних параметрів, механічних властивостей, гідро- і повітропроникності. Спеціальні випробування проводили відповідно до ГОСТ 25277-82; стендові випробування виконували згідно з вимогами ГОСТ 2.601-95; вимір параметрів – за ГОСТ 17108-86. Перевірку стійкості фільтроелемента при максимальному перепаді тиску (0,5 МПа) визначали за ГОСТ 26070-83. Результати випробувань показали, що фільтроелементи зі свинцевого волокна пористістю від 20% до 60% мали такі показники:

- коефіцієнт проникності,  $\text{м}^2$  ..... від  $10^{-9}$  до  $10^{-7}$ ;
- максимальний розмір пір, мкм. .... до 1000;
- середній розмір пір, мкм ..... від 10 до 300;
- питома поверхня,  $\text{м}^2/\text{м}$  ..... від 0,01 до 80;
- розподіл локальної проникності (коефіцієнт варіації) ..... від 0 до 0,5;
- капілярний потенціал,  $\text{м}^2/\text{с}^2$  ..... до 8;
- межа міцності при поперечному згинанні, МПа ... від 30 до 60.

В цілому зроблений висновок про те, що свинцеві волокнові фільтроелементи відповідають ГОСТ 17108-86. Вони мають гарну проникність, стійкі проти впливу агресивних середовищ, мають високу пружність, допускають легку регенерацію. Високий коефіцієнт проникності при мінімальних розмірах пір сприяє підвищенню терміну служби фільтрів, зменшенню їхніх габаритів і маси, дає можливість одержувати якісний фільтрат.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Розроблено математичну модель напруженого і деформованого станів на контакті дискретних тіл, що деформують при зсувних деформаціях, яка зв’язує розміри системи „метал волокна – вторинна структура” з її фізико-механічними характеристиками і, тим самим, дозволяє прогнозувати руйнування волокнової випресовки.

2. Розроблено методику механічних випробувань волокнових випресовок на розривання для оцінки адгезійного зв’язку деформованих волокон. Вперше за допомогою дослідження кількісної оцінки адгезійного зв’язку деформованих волокон отриманий розподіл величини захоплювання дискретних ниток по перетину волокнової випресовки.

3. На основі експериментальних досліджень пресування гранул на волокна, кількісної оцінки адгезійного зв’язку деформованих волокон, металографічних досліджень поверхні контакту

деформованих частинок визначене оптимальне розділове середовище для гарантованого одержання роз’єднаних волокон у процесі пресування.

4. З урахуванням складності реологічних процесів, що проходять на поверхнях дискретних частинок, які деформують, відкоректована методика приготування металографічних мікрошліфів з волокнових свинцевих випресовок. Результати механічних випробувань підтверджені металографічними дослідженнями поверхні поділу дискретних частинок, механізмами текстуроутворення і руйнування осередків захоплювання деформованих волокон.

5. Проведено теоретичні й експериментальні дослідження впливу різних профілів інструмента на процес пресування волокон і на основі аналітичного дослідження поля лінії ковзання сталості стадії пресування оптимізована робоча геометрія інструмента для стабільного процесу одержання роз’єднаних свинцевих волокон з литих гранул із мінімальними енергосиловими параметрами пресування.

6. Візеопластичним методом установлені поля відносних осьових і радіальних швидкостей переміщення гранул у процесі пресування волокон через різні профілі матричних лійок, визначені величини інтенсивностей швидкостей деформацій і, як наслідок, отримана оптимальна геометрія інструмента для пресування гранул на волокна.

7. Встановлено оптимальні деформаційні умови одержання роз’єднаних свинцевих волокон: коефіцієнт витяжки  $\mu = 81$ ; висота калібруючого пояса матриці  $h$  не більше 1 мм; профіль матричної лійки відповідає лінії ковзання, що поділяє пружні і пластичні зони стаціонарної стадії пресування; параметр шорсткості поверхні матричної лійки  $R_a$  – від 1,6 до 3,2 мкм; розділове середовище – суспензія графіт-гліцерин з розрахунку від  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$  кг графіту і від 0,4  $\cdot 10^{-3}$  до 0,6  $\cdot 10^{-3}$  л гліцерину на 1 кг насипної ваги гранул.

8. Розроблено рекомендації, що вносять зміни в технологію одержання свинцевих волокон пресуванням литих гранул, яка раніше існувала, що стосуються вибору розділового середовища й оптимізації пресового оснащення. Внесені зміни дозволили знизити величину браку з 15% до 1...2% при виробництві металевих волокон і одержати при цьому економічний ефект 872 гривні на одну тону виготовлених ниток.

9. Викладені в роботі результати теоретичних і експериментальних досліджень одержання роз’єднаних свинцевих волокон з литих гранул апробовані при очищенні відпрацьованих електролітів для спільного знежирення-травлення відповідно до вимог ГОСТ 17108-86.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНИЙ У РОБОТАХ:

1. Шепельский Н.В., Свяцкий В.В. Механизм разрушения по границам раздела деформируемых частиц при прессовании // Перспективні технології та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії. – Краматорськ: ДДМА, 2000. – С. 38 – 40. (Здобувач провів дослідження текстуроутворення при пресуванні гранул на волокна і характеру руйнування волокнових випресовок).

2. Шепельский Н.В., Свяцкий В.В. Влияние геометрии очага деформации на процесс получения разобщенных волокон при прессовании литых гранул // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні: Збірн. науков. праць ДДМА. – Краматорськ-Слов'янськ, 2000. – С. 242 – 248. (Для одержання розділених волокон здобувач на підставі аналізу поля ліній ковзання при пресуванні запропонував використовувати профіль матричної лійки, виконаний по лінії ковзання).

3. Шепельський Н.В., Свяцкий В.В., Пукалов В.В. Методика приготування металографічних шліфів з волокнистих свинцевих зразків // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наукових праць КДТУ. – Кіровоград: КДТУ, 2000. – Вип. 6. – С. 4 – 7. (Здобувач відкоригував методику приготування металографічних мікрошліфів з волокнистих свинцевих випресовок).

4. Шепельский Н.В., Свяцкий В.В. Выбор рациональной геометрии матричной воронки для прессования // Физика и техника высоких давлений. – 2000. – Том 10. – №4. – С. 57 – 62. (Здобувач на підставі аналізу поля ліній ковзання при пресуванні запропонував використовувати профіль матричної лійки, виконаний по лінії ковзання).

5. Шепельский Н.В., Свяцкий В.В. Оптимизация геометрии очага деформации при прессовании // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. науков. праць ДДМА. – Краматорськ, 2001. – С. 246 – 252. (Здобувач на підставі аналізу поля ліній ковзання при пресуванні запропонував використовувати профіль матричної лійки, виконаний по лінії ковзання).

6. Шепельский Н.В., Свяцкий В.В. Волокновые фильтровальные элементы для очистки агрессивных сред // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. – Кіровоград: КДТУ, 2001. – Вип. 8. – С. 139 – 144. (Здобувач провів випробування волокнового фільтруючого елемента для очищення агресивних середовищ).

7. Шепельский Н.В., Пукалов В.В., Свяцкий В.В. Разработка технического задания на проектирование опытно-промышленной установки непрерывного получения металлических волокон // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. науково-техн. зб. – Кіровоград: КДТУ, 2001. – Вип. 31. – С. 141 – 145.

(Здобувач розробив технічне завдання на проектування установки пресування гранул на волокна).

8. Свяцкий В.В. Особенности технологии получения металлических волокон прессованием литых гранул // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні: Збірн. науков. праць ДДМА. – Краматорськ-Хмельницький, 2002. – С. 242 – 248.

9. Шепельский Н.В., Свяцкий В.В., Лукьяненко Л.П. Особенности пластического течения гранул при прессовании волокон через криволинейные матрицы // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наукових праць КДТУ. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – Вип. 13. – С. 386 – 391. (Здобувач візеопластичним методом провів дослідження кінетики течії гранул у процесі пресування гранул на волокна).

## АННОТАЦІЯ

Свяцкий В.В. Разработка теоретических положений и усовершенствование технологии прессования адгезионно разобщенных волокон из свинцовых гранул. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением. Донецкий национальный технический университет, Донецк, 2004.

Диссертация посвящена усовершенствованию технологии получения разобщенных свинцовых волокон методом прессования литых гранул с последующим их использованием в качестве исходного материала в производстве пористых систем фильтрации.

Проведено аналитическое исследование механики деформирования дискретной среды с учетом наложения сдвиговых деформаций. Разработана математическая модель напряженного и деформированного состояний на контакте деформируемых дискретных тел при сдвиговых деформациях, связывающая размеры системы “металл волокна – вторичная структура” с ее физико-механическими характеристиками, позволяющая прогнозировать получение разобщенных волокон при прессовании гранул. По результатам анализа модели схватывания получена зависимость коэффициента прочности сцепления поверхностей деформированных нитей по сечению волокновой выпресовки для различных деформационных условий.

Выполнены металлографические исследования влияния различных сред на процесс разделения волокон в зависимости от деформационных условий прессования. С учетом сложности процессов, происходящих при прессовании гранул на волокна в условиях интенсивных сдвигов, откорректирована методика приготовления микрошлифов из волокновых выпресовок. Изучение текстуры деформации при прессовании гранул без разделительных сред показало, что характер разрушения волокновых выпресовок носит вязкий чашечный характер.

Проведены механические испытания волоконных выпрессовок на сжатие и на разрыв для оценки адгезионной связи деформированных волокон. Посредством исследования количественной оценки адгезионной связи деформированных волокон получено распределение величины схватывания дискретных нитей по сечению волоконной выпрессовки. Результаты механических испытаний подтверждены металлографическими исследованиями поверхности раздела дискретных частиц, механизмами текстурообразования и разрушения очагов схватывания деформированных волокон.

На основании экспериментальных исследований прессования гранул на волокна, количественной оценки адгезионной связи деформированных волокон, металлографических исследований поверхности контакта деформированных частиц определена оптимальная разделительная среда для гарантированного получения “разобщенных” волокон в процессе прессования.

На основании аналитического исследования поля линии скольжения установившейся стадии прессования проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния различных профилей инструмента на процесс прессования волокон и оптимизирована рабочая геометрия инструмента для стабильного процесса получения разобщенных свинцовых волокон из литых гранул с минимальными энергосиловыми параметрами прессования.

Визеопластическим методом установлены поля относительных осевых и радиальных скоростей перемещения гранул в процессе прессования волокон через различные профили матричных воронок, определены величины интенсивностей скоростей деформаций и, как следствие, определены оптимальные деформационные условия получения разобщенных свинцовых волокон.

Разработаны рекомендации, вносящие изменения в ранее существовавшую технологию получения свинцовых волокон прессованием литых гранул, касающиеся выбора разделительной среды и оптимизации прессовой оснастки. Внесенные изменения позволили снизить величину брака с 15% до 1...2% при производстве металлических волокон и получить при этом экономический эффект 910 гривен на одну тонну изготовленных нитей.

Изложенные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований получения разобщенных свинцовых волокон из литых гранул апробированы при очистке отработанных электролитов для совместного обезжиривания-травления согласно требованиям ГОСТ 17108-86.

Ключевые слова: прессование, сдвиговые деформации, волокно, гранула, разделительная среда, вторичная структура, металлография, механические испытания, профиль матрицы, визеопластический метод, фильтр.

## АНОТАЦІЯ

Свяцкий В.В. Розробка теоретичних положень і удосконалення технології пресування адгезійно роз’єднаних волокон зі свинцевих гранул. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси і машини обробки тиском. Донецький національний технічний університет, Донецьк, 2004.

Дисертація присвячена удосконаленню технології одержання роз’єднаних свинцевих волокон методом пресування литих гранул з наступним їхнім використанням за вихідний матеріал у виробництві пористих систем фільтрації.

Розроблено математичну модель напруженого і деформованого станів на контакті дискретних тіл, що деформують при зсувних деформаціях, отримана залежність коефіцієнта міцності зчеплення поверхонь деформованих ниток по перетину волоконної випресовки для різних деформаційних умов.

На основі аналітичного дослідження поля лінії ковзання сталої стадії пресування проведені теоретичні й експериментальні дослідження впливу різних профілів инструмента на процес пресування волокон та оптимізована робоча геометрія інструмента для стабільного процесу одержання роз’єднаних свинцевих волокон з литих гранул з мінімальними енергосиловими параметрами пресування.

Розроблено рекомендації, що вносять зміни в технологію одержання свинцевих волокон пресуванням литих гранул, яка раніш існувала, що стосуються вибору розділового середовища й оптимізації пресового оснащення.

Ключові слова: пресування, зсувні деформації, волокно, гранула, розділове середовище, вторинна структура, металографія, механічні іспити, профіль матриці, візеопластичний метод, фільтр.

## SUMMARY

Svyatsky V.V. The Theory Development and Technology Improvement of Adhesive Separated Fibres Extrusion from Lead Granules. – Manuscript.

Thesis for candidate degree (technical sciences) on speciality 05.03.05 – Processes and machines of pressure working. Donetsk National Technical University, Donetsk, 2004.

The thesis to technology improvement of separated leaden fibres production by cast granules extrusion with their subsequent use as an initial material in porous filtration systems production is devoted.

The mathematical model of strain and stress state on contact of deformable discrete bodies under shear deformations is building; the dependence of adhesive strength durability coefficient of the deformed fibres surfaces on section fibre pressing for various deformation conditions is received.

On the analytical research basis of a sliding line field of the extrusion steady stage are carried out theoretical and experimental researches of different matrix funnel structures influence on fibres extrusion process and the tool working geometry for stable process of the separated leaden fibres production from cast granules with minimal energy-power extrusion parameters is optimized.

The recommendations making an alteration in earlier existing technology of leaden fibres production by cast granules extrusion which concerning choice of isolation medium and extrusion equipment optimization are developed.

Key words: extrusion, shear deformations, fibre, granule, isolation medium, secondary structure, metallography, mechanical tests, matrix funnel structure, visual plastic method, filter.

---

Підп. до друку 22.04.04

Формат 60×84 1/16

Ум.-др. арк. 1,2

Тираж 100 прим.

Замовлення № 266

---

РВЛ КДТУ

25006, Україна, м. Кіровоград, просп. Університетський, 8