ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Іваницького Станіслава Георгійовича** «Наукові засади та розрахункові методи отримання базальтових неперервних волокон з підвищеними характеристиками міцності» поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали

Актуальність теми дисертації та відповідність роботи спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали.

Розвиток сучасної промисловості супроводжується зростанням вимог до композиційних матеріалів конструкційного призначення, які повинні забезпечувати високі характеристики міцності та теплостійкості,мати низьку питому вагу і можуть працювати в умовах високих навантажень, температур, окислювального середовища, що визначає експлуатаційні властивості матеріалу.

Основний прогрес в сфері розробки нового покоління композиційних матеріалів, пов'язаний із створенням нових неметалевих волокнистих матеріалів де в якості наповнювачів виступають базальтові волокна. При цьому, слід зазначити, що технологічні процеси виготовлення якісних базальтових волокон залежать від багатьох фізичних аспектів. Потребує додаткового вивчення вплив процесів виготовлення і термообробки базальтових волокон на їх структуру, ступінь їх дефектності і міцність. Дослідження питань мінімізації вмісту в волокнах дефектів у вигляді кристалів і об'ємних пор, що визначає експлуатаційні властивості волокон, є актуальним завданням досліджень.

Актуальність роботи підтверджується також і тим, що дана дисертація є узагальненням наукових результатів, отриманих за участю автора при виконанні науково-дослідних тем в рамках тем відомчого замовлення в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

З погляду вищезазначеного, надана до розгляду дисертаційна робота є актуальною, а представлений матеріал наукових досліджень змістовно відповідає спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, їх достовірність

Аналіз дисертації та автореферату Іваницького С.Г. показав, що висунуті наукові положення, висновки та рекомендації, які викладені в роботі, повною мірою обґрунтовані на підставі глибокого аналізу здобувачем літературних джерел, що стосуються процесів створення безперервних базальтових волокон, а також результатів власних досліджень.

Достовірність результатів роботи забезпечена коректністю постановки задач і застосуванням сучасних методів лабораторного експерименту з

використанням стандартних методів випробувань і методів математичного моделювання та чисельних методів. Вона підтверджується зіставленням отриманих результатів з відомими аналітичними, математичними й експериментальними даними і їх інтерпретацією, що узгоджується з існуючими теоретичними розробками в галузі матеріалознавства.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів.

У дисертаційній роботі одержано ряд нових теоретичних та експериментальних результатів. До найбільш вагомих наукових положень, отриманих в результаті виконання роботи, на мій погляд відносяться наступні:

1. Вперше експериментально підтверджено і кількісно проаналізовано, що величина міцності неперервного базальтового волокна пропорційна швидкості охолодження розплаву в області склування при отриманні волокон та показано, що неоднорідність структури волокон, яка визначає їх міцність, залежить від параметрів формування.

2. Встановлено, що при формуванні БНВ поверхневий натяг сприяє «заліковуванню» дефектів у вигляді пор, тоді як розтягуюча напруга обумовлює їх зростання. Тому для підвищення міцності волокон необхідно керувати цими процесами, шляхом створення необхідного температурного поля в струмені, з одного боку, і натягом та швидкістю витягування, з іншого. Вперше встановлено, що значне зниження міцності волокон при термообробці пов'язане з поруватістю волокон та розвитком мікрокристалічної фази в вихідних волокнах, яка оцінюється величиною температурного і часового інтервалів зони кристалізації при їх отриманні.

3. Вперше, на основі багатофакторних експериментальних досліджень встановлено, що витрата базальтових розплавів залежить від діаметра фільєри, рівня розплаву в живильнику та температури вироблення волокон і не залежить від швидкості їх витягування. Запропоновано емпіричні формули розрахунку величини витрати і швидкості течії розплаву в фільєрі, які враховують вплив параметрів формування волокон та реологічних властивостей розплавів.

4. Вперше запропоновано алгоритм оцінки температурної залежності в'язкості базальтових розплавів в струмені при отриманні волокон за допомогою рівняння Фогеля-Фулчера-Таммана. Вперше запропоновано процедуру визначення температури силування базальтових розплавів з використанням кінетики релаксаційних процесів в зоні формування.

5. Вперше розроблено універсальну математичну модель, що описує гідродинамічні, теплообмінні, реологічні процеси, що відбуваються в скломасі на всіх стадіях формування БНВ. Модель дозволяєпроаналізувати вплив фізико-хімічних властивостей розплаву та вихідних параметрів формування на розвиток дефектів, показники міцності волокна, визначення температурної області склування, температурних і часових параметрів зони кристалізації.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано **27** наукових праць: **15** статей у наукових фахових виданнях, з них **12** входять до переліку наукових фахових видань МОН України (**2** статті у науковому виданні, яке входить до наукометричної бази даних WebofScience), **10** публікацій за матеріалами доповідей на науково-технічних конференціях та отримано **2** патенти України на корисну модель.

Вказані публікації, в цілому, відображають основний зміст дисертації, об'єм і характер проведених теоретичних і практичних досліджень. Аналіз друкованих праць дає підставу вважати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які викладено в дисертаційній роботі, повністю висвітлено в наукових працях.

Дисертація та автореферат написані грамотно, лаконічно, стиль викладення матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує легкість і доступність їх сприйняття. Автореферат дисертації повністю відображає зміст дисертаційної роботи.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам

Дисертаційна робота Іваницького С.Г. складається з **11** авторських аркушів і включає: основний текст дисертації на **7,7** авторських аркушах, **28** таблиць, **48** рисунків, **1** додаток, список використаних джерел із **279** найменувань.

У **вступі** належним чином обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено відомості щодо апробації роботи та публікації за темою дисертації.

В **першому** розділі наведено ґрунтовний аналіз літературних даних щодо технологій створення базальтових неперервних волокон. Особлива увага приділена основним факторам, які впливають на характеристики міцності отриманих волокон, та можливості їх підвищення і стабілізації. Проаналізовано вплив на формування і характеристики міцності волокон фізико-хімічних властивостей силікатних розплавів. Проведено критичний огляд сучасних моделей формування волокон, показаноїх переваги та недоліки.

За результатами критичного аналізу літературних даних сформульовано мету та визначено основні завдання досліджень.

Другий розділ присвячено експериментальному дослідженню фізико-хімічних і реологічних властивостей базальтових розплавів та структурно-механічних характеристик одержаних з них волокон. Викладені методики досліджень властивостей розплавів і волокон, опис експериментальних установок та обладнання.

Як модельні об'єкти вибрано базальти Підгірнянського та Берестовецького родовищ України, які відрізняються між собою по хімічному й мінералогічному

складу. Досліджено в'язкість розплавів, поверхневий натяг, густину,кристалізаційну і змочувальнуздатністьрозплавів та фізико-механічні характеристики отриманих волокон в залежності від технологічних параметрів.

Проведені дослідження мікроструктури поверхні неперервних волокон, витягнутих з модельних базальтів, методом оптичної мікроскопії. Проведена термообробка на повітрі волокон отриманих з модельних базальтів. Визначено дефектний стан волокон адсорбційно-структурним методомв залежності від режимів термообробки.

У **третьому** розділі наведено експериментальні дослідження закономірностей формування БНВ описано умови формування волокон і визначено витрати розплавів через фільєру. Досліджені гідродинамічні і термічні параметри течії розплавів базальтів в фільєрі і визначена температура і градієнт температури на виході фільєри.

Визначено вплив кожного з основних технологічних параметрів на механізм волокноутворення та на величину масової витрати силікатних розплавів через фільєру.Застосовано багатофакторний аналіз шляхом зміни одного з параметрів при стабілізації інших на заданому рівні.

У **четвертому розділі**представлено аналітичні дослідження реологічних характеристик і поведінки скломаси модельних базальтів в області склування і твердіння при швидкому охолодженні та значній напрузі.

Застосовано рівняння Фогеля-Фулчера-Таммана для оцінки в'язкості розплавів і стекол при низьких температурах. Методом інтерполяційних розрахунків були отримані константи даного рівняння.

При аналізі реологічного стану базальтових розплавів в області склування, за допомогою законів реології доведено, що кінцевий процес волокноутворення можна описувати в наближенні моделі Кельвіна-Фойхта, яка коректно описує ізотермічну деформацію в'язко-пружного непластичного тіла.

П'ятий розділ присвячено принципу розробки математичної моделі формування неперервного волокна з силікатних розплавів, яка базується на результатах експериментальних і аналітичних досліджень, наведених в попередніх розділах. Приведені результати розрахунків основних параметрів струменю, включаючи розтягуючу напругу, при різних умовах формування волокон.

В шостому розділі розглядаються умови забезпечення підвищених і стабільних характеристик міцності БНВ шляхом вибору раціональних режимів формування. Вивчається вплив параметрів формування на розвиток структурних дефектів різного походження в волокні, які визначають його міцність.

На основі математичної моделі проведено аналітичне дослідження по визначенню температурної та часової зони кристалізації, швидкості охолодження розплавів модельних базальтів в залежності від параметрів процесу формування. Показано, що в зоні кристалізації відбувається розвиток кристалічної фази, а ширина цієї зони залежить від параметрів формування та

швидкості охолодження. Встановлено, що найбільша міцність зафіксована в волокнах з модельних базальтів, які сформовані при таких режимах і параметрах формування, коли швидкість охолодження при склуванні скломаси найвища.

Розглянуті причини збільшення поруватості волокон при зниженні температури вироблення волокон, що відбувається при витягуванні під дією розтягуючого напруження і дії сил поверхневого натягу при охолодженні.

Показано, що кристалічні зародки спочатку виникають у вигляді вкраплень в тілі аморфної фази, при цьому, внаслідок неузгодженості деформування різних фаз, виникає міжфазна межа, де за різних причин локалізуються напруження. Наявність таких напружень може призводити до виникнення і подальшого існування щілиноподібних пор, що було враховано в узагальненій моделі В.В. Скорохода про тимчасове домінування процесу зростання пор над процесами ущільнення.

Дисертаційна робота містить науково обґрунтовані та раніше не захищені наукові положення, якісний експериментальний матеріал і достовірні, чітко сформульовані висновки, що в сукупності може бути охарактеризовано як успішне вирішення наукової проблеми.

Практичне значення результатів роботи

Результати проведених в дисертації комплексних досліджень дозволяють науково обґрунтувати рекомендації по вибору сировини, покращенню управління технологічними параметрами виробництва БНВ з високими і стабільними характеристиками міцності і зменшення в них дефектів. Для забезпечення цього необхідно більш точно контролювати параметри процесу і зону охолодження при формуванні волокон, знизити температурні градієнти по фільєрному полю живильника. Запропоноване в роботі емпіричне рівняння дозволяє розраховувати величину витрати (дебіту) розплавів і оцінювати продуктивність виробництва волокон без проведення додаткових експериментів. Одержані в роботі результати можуть бути застосовані також при удосконаленні існуючого і проектуванні нового технологічного обладнання для виробництва БНВ.

Матеріали дисертації підтверджено актом впровадження на ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» від 18 січня 2021 р. та патентами України на корисну модель.

Загальні зауваження щодо змісту дисертації

Попри загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, у ній присутній ряд недоліків, по яких можуть бути сформульовані наступні зауваження:

1. В таблиці 3 автореферату зазначено, що міцність волокон з Берестовецького базальту суттєво залежить від температури термообробки і знижується вдвічі і більше, а для Підгірнянського базальту міцність практично не змінюється, але пояснення цьому немає.

2. Не пояснюється, чим обумовленавелика різниця в величині витрат розплавів Берестовецького базальту (до 22 мг/с), на відміну від витрат розплавів Підгірнянського базальту (менше 11 мг/с) ?

3. В розділі 4 розглядаються рівноважна і дійсна швидкості охолодження, але не зрозуміло в чому їх різниця і фізичний сенс.

4. В роботі зустрічаються також деякі орфографічні та стилістичні помилки. В авторефераті і дисертації часто використовується фраза «…при всіх режимних параметрах…», краще було б використовувати термін «технологічні параметри» або «технологічні режими». В дисертації, в описанні методики визначення модуля пружності волокон написано «…і тим же способом…», треба було написати «…в той же спосіб…».

5. Підписи до деяких рисунків, наприклад, рис.11 автореферату, не зовсім зрозумілі.

Загальний висновок по дисертації.

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Вважаю, що дисертаційна робота Іваницького С.Г. є завершеною науковою працею, містить одержані автором нові наукові та прикладні результати в галузі матеріалознавства, які в сукупності розв'язують актуальні науково-технічні проблеми розробки наукових засад формування властивостей базальтових неперервних волокон.

Автореферат повною мірою відповідає змісту та основним положенням дисертації, а робота загалом повністю відповідає вимогам пунктів 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567; її зміст відповідає паспорту спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали, а автор дисертації – ІваницькийСтаніславГеоргійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за відповідною спеціальністю.

Офіційний опонент,
доцент кафедри високотемпературних матеріалів
та порошкової металургії Національного технічного
університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
старший науковий співробітник
кандидат технічних наук Анатолій МІНІЦЬКИЙ

Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона

Підпис Анатолія МІНІЦЬКОГО ЗАСВІДЧУЮ

С.О. Кузнецова