

ВІДГУК

офіційного опонента д-ра техн. наук, професора **Сизоненко Ольги Миколаївни** на дисертацію **Вдовиченко Олександра Васильовича «Ідентифікація мезоструктури та визначення властивостей порошкових і композиційних матеріалів методами акустичної спектроскопії»**, що подана до спеціалізованої вченої ради Д26.207.03 на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство» Технічні науки (13 Механічна інженерія)».

Дисертаційна робота виконана в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України і складається із вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і 8 додатків. Загальний обсяг роботи складає 360 сторінок машинописного тексту. Дисертація містить 116 рисунків, 17 таблиць і 507 бібліографічних найменувань. Автореферат дисертації містить 36 сторінок тексту, в тому числі список із 54 робіт, опублікованих за темою дисертації.

1. Актуальність теми та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Створення нових матеріалів з прогнозованими характеристиками, що дозволяють підвищити надійність та подовжити ресурс машин і механізмів в енергетичній, нафтохімічній та авіакосмічній галузях, а також виробів біомедичного призначення є актуальною проблемою сучасного матеріалознавства. В рамках цієї проблеми постають завдання ідентифікації особливостей структури та їх впливу на формування властивостей матеріалів під час виготовлення, а також контролю накопичення пошкоджень в процесі експлуатації готових виробів в умовах агресивних середовищ і термосилових навантажень. Для порошкових (ПМ) і композиційних матеріалів (КМ) властиві специфічні особливості структури, зумовлені самим способом виготовлення: об'ємні пори, неповністю сформовані контакти між частинками порошку та поверхні розділу між фазами, які утворюють мезоструктуру матеріалів і істотно впливають на експлуатаційні характеристики. Передумовою створення нових ПМ і КМ із заданими властивостями є поглиблене розуміння процесів формування структури на різних ієрархічних рівнях, зокрема еволюції згаданих елементів мезоструктури різних типів.

В роботах відомих вітчизняних та закордонних вчених були розвинуті ефективні методи контролю ПМ за швидкістю та згасанням ультразвукових хвиль. Проте існуючі методи не надають можливості розрізнити тип елемента мезоструктури: об'ємна пора чи неповністю сформований контакт або тріщина. Оптимізація термосилових параметрів і часу консолідації дозволяє заощади енергію і водночас покращити характеристики міцності і тріщиностійкості внаслідок запобігання рекристалізації. Представлена робота спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми з розробки методології ідентифікації структури ПМ і КМ новими акустичними методами з метою забезпечення створення виробів з заданими фізико-механічними властивостями. Зважаючи на це, проведення зазначених досліджень і тема роботи є **актуальними**.

Робота виконана у відповідності з планами науково-дослідних робіт Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, а дисертант був в них відповідальним виконавцем.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, достовірність отриманих результатів

Наукові положення і висновки підтверджуються застосуванням сучасних методів досліджень характеристик пружності і здатності до демпфування, модуля Юнга та декремента коливальних. Отримані експериментальні дані добре узгоджуються з результатами математичного моделювання методом скінченних елементів та у вигляді аналітичних функцій впливу площинних дефектів та способу пружного деформування на макроскопічні модулі пружності і швидкості поширення пружних хвиль в ПМ.

Автором роботи вперше запропонована методологія розрізнення об'ємних (пори) і площинних (неповністю сформовані контакти між частинками, розшарування) елементів мезоструктури на підставі аналізу акустичних коливань в умовах резонансу, яка ґрунтується на уявленнях про нелінійно-пружну поведінку порошкових, композиційних та пошкоджених матеріалів. Достовірність основних положень і висновків не викликає сумнівів і підтверджується успішними впровадженнями методу контролю під час виготовлення виробів, оптимізації існуючих технологій виготовлення та для неруйнівного контролю виробів в процесі експлуатації.

3. Наукова новизна отриманих результатів

У процесі досягнення мети і вирішення завдань дослідження були отримані наступні наукові результати:

1. Вперше запропонована методологія розрізнення об'ємних (пори) і площинних (неповністю сформовані контакти між частинками, розшарування) елементів мезоструктури на підставі аналізу акустичних коливань в умовах резонансу. Наведена методологія ґрунтується на уявленнях про нелінійно-пружну поведінку порошкових, композиційних та пошкоджених матеріалів.

2. Експериментально встановлено, що особливості акустичного відгуку – відхилення форми пружних коливань від гармонійних в часовій області, амплітудна залежність резонансних частот та втрата симетрії резонансних кривих в частотній області – є універсальними для керамічних, металевих і композиційних матеріалів і що вони обумовлені станом контактів між частинками, натомість об'ємні пори впливають лише на значення лінійних характеристик пружності.

3. Вперше доведено, що ефективний відгук порошкових та пошкоджених матеріалів обумовлюється різним їх опором стиску та розтягу, кількісно пов'язаним з вмістом площинних елементів (дефектів) мезоструктури матеріалів, сформованих в процесі виготовлення чи набутих під час експлуатації.

4. Вперше отримано комплекс експериментальних даних про динамічну пружність і здатність до демпфування спечених порошкових Fe, Ti, Al₂O₃, та одержаних екструзією КМ «алюмінієві сплави/SiC» в залежності від характеристик внутрішньої будови та технології. Встановлено, що в ПМ з неповністю сформованими контактами між частинками ефективні характеристики пружності не є константами матеріалу, а змінюються в залежності від амплітуди і тривалості циклічного деформування, та виявлено закономірності цих змін.

5. Встановлено головну роль стану сформованих в процесі спікання контактів в розсіюванні енергії коливань пористими ПМ: здатність до демпфування спеченого Ti зростає зі збільшенням пористості лише за наявності неповністю сформованих контактів, натомість у повністю консолідованих ПМ вона не залежить від пористості і відповідає такій литого Ti.

6. Вперше виявлено сильні нелінійні акустичні ефекти (асиметричність резонансної кривої, залежність частоти резонансу від напрямку зміни частоти збурення) під час коливань однофазного Ti₃Sn та встановлено експоненціальну повністю оборотну залежність резонансної частоти від амплітуди коливань та залежність внутрішнього тертя від частоти коливань.

4. Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному: створено нові науковопрактичні принципи ідентифікації структури ПМ і КМ, які можуть бути використані для розробки нових та оптимізації існуючих технологій виготовлення та для неруйнівного контролю виробів в процесі експлуатації. Відповідно до сформульованої концепції розроблено способи визначення пружності і дефектності, захищені 5 патентами України на винахід. Результати досліджень були використані на Казенному заводі порошкової металургії, м. Бровари (Україна) і дозволили підвищити достовірність контролю під час виготовлення виробів із спечених матеріалів, і таким чином покращити

їхні кінцеві експлуатаційні характеристики. Розроблена «Методика визначення дефектності матеріалу деталей магістральних газопроводів з використанням методу механічної резонансної спектроскопії» була прийнята в експлуатацію в Управлінні магістральних газопроводів «Львівтрансгаз» компанії «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України».

5. Повнота викладу основних результатів дисертації у фахових виданнях

Результати досліджень по дисертації опубліковані в 54 наукових працях, із них 35 статей в наукових фахових виданнях України та інших держав, з яких 14 індексуються міжнародними наукометричними базами даних (SCOPUS, Web of Science, Thomas Reuters, Google Scholar та ін.), 5 патентів України на винахід, та 14 публікацій за матеріалами доповідей на міжнародних наукових конференціях.

6. Рекомендації з використання результатів і висновків дисертації

Результати роботи були використані на Казенному заводі порошкової металургії і дозволили підвищити достовірність контролю під час виготовлення виробів із спечених порошкових матеріалів і таким чином покращити їх кінцеві експлуатаційні характеристики. «Методика визначення дефектності матеріалу магістральних газопроводів з використанням методу механічної резонансної спектроскопії» була впроваджена в експлуатацію в Управлінні магістральних газопроводів «Львівтрансгаз» Дочірньої компанії «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України».

7. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому

У першому розділі проаналізовано сучасний стан проблеми створення матеріалів з прогнозованими властивостями з використанням моніторингу як складової керування процесами структурних та фазових перетворень, стан теоретичних та експериментальних досліджень впливу елементів мезоструктури матеріалів, що виробляються за порошковими технологіями, на пружність та інші механічні характеристики, та аналіз можливостей існуючих методів контролю для ідентифікації виду цих дефектів. Аналіз вітчизняних за зарубіжних робіт показав, що, практично не дослідженими залишався вплив параметрів структури ПМ і КМ, залежних від технологічних факторів, на згадані нелінійні акустичні явища і можливість їх використання для моніторингу процесів створення матеріалів. Дослідження процесів консолідації ПМ на початкових її стадіях методом біжучої хвилі ускладнене сильним згасанням вищих гармонік, тому визнано доцільним застосувати резонансні методи досліджень, коли амплітуди коливань є на порядки більшими, що полегшує аналіз результатів і підвищує його достовірність. На основі проведеного аналізу стану проблеми було визначено мету і завдання дисертаційної роботи та обрано об'єкти дослідження.

У другому розділі викладена загальна методика і основні методи дослідження матеріалів з мезодефектною структурою та наведені результати власних методичних розробок автора. Запропонована методологія розрізнення мезодефектів різного типу на підставі аналізу відгуку матеріалів на акустичне збурення в умовах резонансу в частотній, часовій і частотно-часовій областях. Для реалізації можливості визначення лінійних характеристик пружності і непружності досліджуваних матеріалів методом резонансної ультразвукової спектроскопії (РУС) розроблені і протестовані на монокристалах КВr і зразках аморфного поліметилметакрилату обчислювальні програми для розв'язку прямої і оберненої задач РУС. Точність розв'язку прямої задачі методом Релея - Рітца шляхом відшукування мінімумів функції Лагранжа забезпечувалась використанням базисних функцій у вигляді поліномів у формі Вішера, а оберненої задачі – мінімізацією цільової функції нелінійним методом Левнеберга – Марквардта.

Кількісну оцінку відхилення пружної поведінки матеріалів від закону Гука в частотній області проводили методом швидкого перетворення Фур'є. Зважаючи на велике згасання хвилі в неповністю спечених пористих ПМ, був розроблений спосіб, за яким механічні коливання збурювали в околі однієї з резонансних частот зразка, а збільшення амплітуди коливань зразка за незмінної амплітуди сигналу збурення досягали

наближенням його частоти до частоти резонансу. Для аналізу форми коливань в часовій та частотно-часовій областях були розроблені програми в середовищі MATLAB.

У третьому розділі наведені результати експериментальних досліджень впливу мезоструктури на характеристики акустичних коливань керамічних матеріалів ГАп -склофаза та Al_2O_3 . Встановлено, що зміни швидкості звуку і модуля пружності КМ на основі ГАп обумовлені не лише пористістю, але й іншими факторами, ідентифікувати які класичними акустичними методами не видається можливим. Встановлено, що на швидкість поширення акустичної хвилі і модуль Юнга, обчислений на основі припущень лінійної теорії пружності, істотним чином одночасно впливає низка характеристик мезодефектної структури, а саме пористість, морфологія пор, вміст площинних дефектів, а на коефіцієнт згасання акустичної хвилі – також співвідношення довжини хвилі і розміру елемента структури, яким можуть виступати як мезодефекти структури, так і агломерат порошку. Така мультифакторність засвідчила принципову неможливість ідентифікації типу мезодефекту пористих керамічних матеріалів за результатами класичних акустичних експериментів. На підставі прямих вимірювань в часовій області, встановлено, що резонансні коливання зразків неповністю спеченого оксиду алюмінію є асиметричними відносно положення рівноваги, а функція переміщень може бути задовільно описана частинами двох синусоїд різної частоти в фазах розтягу і стиску, що було підтверджено наявністю переважно парних гармонік в частотному спектрі коливань. Це доводить вирішальний вплив різноопорності розтягу і стиску на особливості акустичної поведінки матеріалів з мезодефектами структури на частотах $\sim 10^4$ Гц. На підставі спільного аналізу результатів вперше встановлено наявність кореляції між комплексом характеристик нелінійних акустичних явищ в зразках оксиду алюмінію, виготовлених за різними технологіями, що свідчить про спільне їх джерело, яким є двовимірні мезодефекти структури (недосконалі контакти між частинками порошку і/або тріщини). Встановлено, що об'ємні пори в діапазоні пористості 0,02...0,26 та їхня топологія в повністю консолідованій кераміці впливають лише на значення модуля пружності і не викликають нелінійних ефектів. Тому використання методів нелінійної резонансної спектроскопії є перспективним для ідентифікації типу дефектів під час неруйнівного контролю керамічних виробів.

В четвертому розділі наведено результати моделювання методом скінченних елементів та у вигляді аналітичних функцій впливу площинних дефектів та способу пружного деформування на макроскопічні модулі пружності і швидкості поширення пружних хвиль в ПМ. На підставі одержаних експериментальних даних, вперше доведено обґрунтованість застосування макроскопічної моделі пружної поведінки неповністю консолідованих ПМ, які містять пори і площинні дефекти, на основі формулювань пружного потенціалу, які у випадку простих напружених і деформованих станів приводять до кусково-лінійних співвідношень між відповідними компонентами тензорів напруження і деформації; запропоновані моделі були використані для оцінки методом скінченних елементів та у вигляді аналітичних функцій впливу площинних дефектів та способу пружного деформування на макроскопічні модулі пружності і швидкості поширення пружних хвиль в ПМ. Модель було покладено в основу вперше запропонованої автором методології визначення характеристик морфології структури мікронеоднорідного матеріалу і встановлення на цих підставах істинних значень характеристик пружності. Досліджено вільні поздовжні коливання стрижня з модельного матеріалу, пружна поведінка якого описується кусково-лінійною функцією, і встановлено, що навіть за відсутності демпфування зі збільшенням різноопорності форма функції деформацій з часом спотворюється.

Запропонована модель вірно відбиває нелінійну пружну поведінку ПМ і дозволяє кількісно описати вплив площинних дефектів на ефективний модуль Юнга матеріалу і на резонансні частоти зразків, і тому вона може бути застосована як модель першого наближення для розв'язку загальної задачі опису некласичної пружної поведінки

гранульованих матеріалів та матеріалів з недосконалими внутрішніми поверхнями розділу.

У п'ятому розділі наведені результати експериментальних досліджень закономірностей впливу еволюції мезодефектів структури, що відбувається під час консолідації матеріалів з порошків металів на характеристики механічних коливань та характеристики пружності. Вперше резонансними акустичними методами отримано комплекс експериментальних даних про пружність, непружність і нелінійні акустичні ефекти, а саме ефекти повільної динаміки, амплітудної залежності резонансної частоти і спотворення форми резонансної кривої, які пов'язані з процесами еволюції мезоструктури під час консолідації пористих порошкових заліза та титану і композиційних матеріалів з порошків алюмінієвого сплаву Al-6Cu-0,4Mn і порошків α -SiC середнім розміром частинок 3 мкм і 14 мкм та алюмінієвих сплавів ПА-2 та АМг5 і порошку SiC. Встановлено, що для всіх досліджених неповністю консолідованих порошкових металів (до моменту рекристалізації ПМ за 1373-1473 К) – модулі пружності перестають бути константою, а залежать від шляху навантаження. Зменшення (зсув) резонансної частоти внаслідок раптового збільшення амплітуди максимальної циклічної деформації можна описати лінійним законом, проте в процесі коливань зі сталою амплітудою резонансна частота зменшується за експоненціальним законом. Після раптового зменшення амплітуди деформації відновлення резонансної частоти відбувається за логарифмічним законом, тобто спостерігається асиметрія деградації і відновлення резонансної частоти коливань.

Вперше встановлено, що нелінійні акустичні явища в порошкових металах і композитах обумовлені в першу чергу станом контактів між частинками, а об'ємні пори в повністю консолідованих ПМ впливають лише на значення резонансних частот.

Встановлено домінуючу роль стану сформованих в процесі спікання контактів в розсіюванні енергії коливань пористими ПМ: здатність до демпфування спеченого титану зростає зі збільшенням пористості від 0,05 до 0,40 лише в неповністю спечених зразках, натомість у повністю консолідованих ПМ вона не залежить від пористості і відповідає такій литого Ті. Встановлено, що декремент коливань пористого порошкового титану збільшується зі збільшенням амплітуди максимальних циклічних деформацій за лінійним законом і ця залежність корелює зі станом контактів між частинками. Встановлено домінуючий вплив стану контактів між частинками порошку на анізотропію пружності, яка властива порошковому титану після пресування та спікання за відносно низьких температур, але практично зникає після спікання за 1273 К в усьому діапазоні пористості (від 0,05 до 0,40). Встановлено, що модуль Юнга, а відтак швидкість поширення поздовжньої ультразвукової хвилі, титану пористістю 0,05, спеченого за 773...973 К, а також пористістю 0,20...0,30, спеченого за 1273 К відповідає характеристикам тканини стегнової кістки. Одержані дані щодо мезодефектної структури дозволяють рекомендувати для виготовлення імплантатів матеріали, спечені за 1273 К, зменшуючи їх характеристики пружності за рахунок підвищення пористості до 0,30.

За результатами досліджень нелінійних акустичних характеристик встановлено, що оптимальна мезодефектна структура формується під час екструзії порошків алюмінієвого сплаву в діапазоні коефіцієнтів витяжки 17...39. Доведено, що характеристики пружності композитів на основі алюмінієвих сплавів зростають зі збільшенням вмісту SiC до певної критичної концентрації, що залежить від розмірів частинок порошків складових після якої пружність зменшується. Показано, що розмір частинок порошку не впливає на властивості сплаву Al-6Cu-0,4Mn, проте зі збільшенням середнього розміру частинок порошку матричного сплаву від 40 до 180 мкм та із зменшенням середнього розміру частинок SiC від 14 до 3 мкм модуль Юнга, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона композита Al-6Cu-0,4Mn/15%SiC зменшуються нижче теоретичних передбачень. Критичною для КМ, зміцнених частинками SiC розміром 100...300 нм є об'ємна концентрація близько 4%, що пов'язано з утворенням агломератів частинок кераміки. Розрахунки, підтверджені дослідженнями нелінійних акустичних характеристик, показали, що крім залишкової

пористості на зменшення пружності КМ впливають недосконалі контакти між частинками кераміки в агломератах.

Запропонована методологія досліджень є перспективною для ідентифікації типу мезодефектів структури та їх еволюції в процесі виготовлення матеріалів з металевих порошків, а характеристики акустичної нелінійності можуть бути обрані за критерій придатності деталей в неруйнівному контролі і в моніторингу технологічних процесів консолідації. Використання результатів досліджень порошкових матеріалів методами механічної резонансної спектроскопії на Казенному заводі порошкової металургії, м. Бровари, дозволило підвищити достовірність контролю під час виготовлення виробів із спечених матеріалів і таким чином покращити їх кінцеві експлуатаційні характеристики.

В шостому розділі наведено результати досліджень мезодефектів, викликаних різними чинниками, а саме утворення дефектів в сталі 20 та 12Х1МФ в результаті тривалої експлуатації в котельному обладнанні під дією перегрітої пари в умовах підвищених температур і тиску та еволюції структури Ti_3Sn в процесі механічних коливань. Досліджено закономірності змін характеристик пружності та розсіювання енергії зразків сталей 20 та 12Х1МФ, вирізаних з елементів парогонів після експлуатації в котлі на Київській ТЕЦ-5 тривалістю до 245,8 тис. годин за температур до $560^{\circ}C$ і тиску до 15,6 МПа. Встановлено, що зразки сталей після тривалої експлуатації, на відміну від матеріалів в вихідному стані, демонструють нелінійну пружну поведінку, яка, зокрема, проявляється у спотворенні форми резонансної кривої і лінійній залежності резонансної частоти від амплітуд коливань. Характер зміни резонансної частоти за амплітудою максимальних циклічних деформацій, що загалом корелює зі середньою швидкістю зростання декременту коливань з амплітудою максимальних циклічних напружень, вказує на наявність нестабільних дефектів, здатних еволюціонувати під дією акустичних коливань. Такими дефектами на думку автора в сталях є недосконалі межі зерен, на яких під дією експлуатаційних факторів виділились карбіди, у випадку 12Х1МФ це - складні карбіди на основі хрому та молібдену типу Me_7C_3 і хромистий карбід $Me_{23}C_6$. На основі проведених досліджень накопичення дефектів в сталях розроблена «Методика визначення дефектності матеріалу магістральних газопроводів з використанням методу механічної резонансної спектроскопії», яка була впроваджена в експлуатацію в Управлінні магістральних газопроводів «Львівтрансгаз» Дочірньої компанії «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України», що підтверджується відповідним актом. Досліджено закономірності впливу частоти та амплітуди акустичного збурення на поведінку інтерметаліду Ti_3Sn складу $Ti_{75,5}Sn_{24,5}$. Вперше серед однофазних литих матеріалів, зокрема інтерметалічних сполук, виявлено сильні нелінійні акустичні ефекти (асиметричність резонансної кривої, залежність частоти резонансу від напрямку зміни частоти збурення) під час коливань однофазного Ti_3Sn і встановлено повністю оборотну експоненціальну залежність від амплітуд коливань уявного модуля Юнга, пропорційного до квадрату резонансної частоти, а також залежність внутрішнього тертя від частоти в діапазоні частот 100...104 Гц. На думку автора, нелінійні ефекти є наслідком оборотного руху меж між двійниками і/або переорієнтації двійників під дією прикладених акустичних навантажень і їхньою взаємодією з перешкодами.

8. Зауваження по роботі

1 В цілому розділ 1 дуже перевантажено, багато зайвою інформації, він займає 58 с, більш ніж розділи 3, 4, 5. Наприклад Розділ 1.1 «Мезоструктура матеріалів та її еволюція в процесі виготовлення» на мій погляд є тривіальним, формулювання до того, що є тріщиною, що є порою і т.п. є в підручниках та посібниках.

2 Розділ 2 (с.92) « Для досліджень обрано матеріали, спечені за різної температури з порошку кераміки Al_2O_3 та порошків металів...». А який був тиск, та як він буде впливати на пори та дефекти? Також не вказано при яких

параметрах були одержані КМ екструзією з порошків пластичного металу та кераміки.

3 Розділ 2 (с.116) – «Оскільки КМ на основі біогенного гідроксиапатиту (БГАп) зберігає свою кристалічну структуру до температури 1200°C, температура формування композитів була підвищена.» Не вказано, при якій температурі формували композит.

4 А у розділі 3 (с. 123) наведено, що «...композити на основі БГАп спікали на повітрі, $T_s < 800$ С та $T_s \geq 1000$ С, охолоджений матеріал подрібнювали, формували, і повторно спікали за $T_s < 800$ С». На с126, також температура спікання $T_s < 800$ С. А як же ж температура формування композитів, яка була підвищена більш ніж 1200 С. До того ж температура в роботі вказана і в «С» і в «К».

5 Розділ 3 (с.130) «Рис. 3.6 Результати дослідження загальної пористості і усадки зразків з 4% ПЕГ в твердій фазі пресовки після спікання за різних температур» та рис. 3.8 «Пористість після спікання від пористості після пресування» А де тиск, який він був при пресуванні та як він впливає на пористість та усадку? Тим паче, що у розділі 5 (с.195) структурні дослідження показали «Середня пористість матеріалу залежала від тиску пресування і слабо залежала від температури спікання»

6 У розділі 5 «Ідентифікація мезоструктури та властивості матеріалів з металевих порошків» (підрозділи 5.2.4. та 5.3.1) не показано, а як розмір та форма частинок (розглядався порошок Ті фракції -315+200 пористістю 0,1, одержаних пресуванням та наступним спіканням за 973 і 1473 К) впливає на формування структури та у подальшому на швидкість ультразвуку? Хоча у висновку 1 до розділу 5 є таке «та титану розміром частинок до 630 мкм, а також окремих його фракцій -630+500, -500+313, -315+200 та -200+100 мкм», а у роботі ці дані ні систематизовані.

7 Не уникнув автор технічного браку в тексті та нечітких формулювань (наприклад висновки у розділі 5, кожний з яких на півлиста), а в авторефераті зазначено, що у роботі 7 додатків, а їх 8.

9. Загальний висновок по роботі

У роботі присутні всі складові частини завершеної дисертації. Автореферат та опубліковані здобувачем статті в фахових виданнях відображають основний зміст і результати дисертаційної роботи. Апробація роботи на наукових конференціях та семінарах є достатньою. Розроблені спосіб визначення модуля пружності та способи визначення дефектності матеріалів пройшли дослідно-виробничі випробування на промислових підприємствах і впроваджені у виробництво.

Представлена на відзив дисертація, незважаючи на відмічені недоліки, є закінченою науково-дослідною роботою, що містить нові технічні рішення значної науково-технічної проблеми з розробки методології ідентифікації структури ПМ і КМ новими акустичними методами з метою забезпечення створення виробів з заданими фізико-механічними властивостями.

За отриманими науковими результатами, стилю викладання та оформленню дисертаційна робота О.В. Вдовиченко повністю відповідає

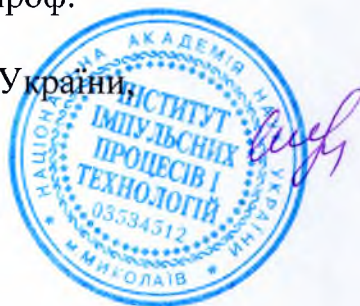
вимогам пунктів 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» (постанова Кабінету міністрів України від 24.07.2013, №567) та Вимогам до оформлення дисертації (Наказ МОН України від 03.02.2017, №40).

Вважаю, що здобувач Вдовиченко Олександр Васильович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.0 «Матеріалознавство».

Офіційний опонент,
головний науковий співробітник,
в.о. завідувача відділу імпульсної
обробки дисперсних систем
Інституту імпульсних процесів
і технологій НАН України,
доктор технічних наук, проф.

О.М. Сизоненко

Підпис доктора техн. наук, проф.
Сизоненко О.М. засвідчую:
Вчений секретар ІПТ НАН України
кандидат технічних наук



А.В. Сінчук