

Ю. Г. БЕЗЫМЯННИЙ, А. Н. ВЫСОЦКИЙ, Т. И. ИСТОМИНА

СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СКОРОСТЬЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГОЙ ВОЛНЫ

По результатам статистической обработки массива экспериментальных данных установлена связь скорости распространения упругой волны с характеристиками состава и свойств многокомпонентных порошковых материалов на основе меди, у которых физико-механические свойства исходных порошков существенно отличаются. Показано, что использование скорости распространения упругой волны в таких материалах перспективно не только для определения функционально связанных с ней модуля упругости и плотности материала, но и для разработки на основе корреляционных зависимостей методов неразрушающей оценки таких свойств материала как твёрдость, прочность, износ, коэффициент трения, а также параметров структуры – пористости и состава.

Ключевые слова: многокомпонентные порошковые материалы, скорость распространения упругой волны, коэффициент корреляции, структура, физико-механические свойства, неразрушающий контроль.

Ю. Г. БЕЗИМЯННИЙ, А. М. ВИСОЦЬКИЙ, Т. І. ІСТОМІНА ЗВ'ЯЗОК ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ШВИДКІСТЮ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНОЇ ХВИЛІ

За результатами статистичної обробки масиву експериментальних даних встановлений зв'язок швидкості поширення пружної хвилі з характеристиками складу і властивостей багатоконпонентних порошкових матеріалів на основі міді, у яких фізико-механічні властивості вихідних порошків істотно відрізняються. Показано, що використання швидкості поширення пружної хвилі у таких матеріалах має перспективу не тільки для визначення функціонально пов'язаних з нею модуля пружності та щільності матеріалу, але і для розробки на основі кореляційних залежностей методів неруйнівної оцінки таких властивостей матеріалу як твердість, міцність, зношування, коефіцієнт тертя, а також параметрів структури – пористості і складу.

Ключові слова: багатоконпонентні порошкові матеріали, швидкість поширення пружної хвилі, коефіцієнт кореляції, структура, фізико-механічні властивості, неруйнівний контроль.

Yu. G. BEZIMYANNIY, A. M. VYSOTSKYY, T. I. ISTOMINA CORRELATION OF CHARACTERISTICS BY MULTICOMPONENT POWDER MATERIALS WITH ELASTIC WAVE VELOCITY

According to the results of statistical processing of the experimental data array, the relationship between the elastic waves velocity with the characteristics of the composition and the properties of multicomponent powder materials on the basis of copper, in which the physical and mechanical properties of the original powders are significantly different. The effectiveness of using the methods of evaluation depends essentially on the physical and mechanical properties of the raw powders and on the co-influence of various factors. Therefore, in order to increase it, it is necessary to adapt the control methodology to the particulars of the composition of the material by conducting a more detailed statistical analysis and using special approaches for abstraction from the hindering factors. In the conditions of sintering, the chemical interaction between the initial components and inclusions did not occur and new phases were not formed. It was shown that the use of the elastic waves velocity in such materials is not only promising not only for determining the module of elasticity and density of the material functionally related to it, but also for developing on the basis of correlation dependences of methods of non-destructive evaluation of material properties such as hardness, strength, wear, coefficient of friction, as well as parameters of structure - porosity and the composition

Keywords: multicomponent powder materials, elastic wave velocity, correlation coefficient, structure, physical and mechanical properties, non-destructive testing.

Введение. Начиная со второй половины прошлого столетия акустические характеристики материалов, в том числе скорость распространения упругих волн (СР УВ), широко используют для оценки физико-механических свойств и особенностей структуры, а также контроля технологических процессов при разработке и изготовлении материалов. В основе этого использования лежит физическая связь СР УВ со свойствами материала. Для характеристик упругости и плотности эта связь определяется функциональной, а для других – корреляционной зависимостью, устанавливаемой экспериментально для каждой задачи. [1-2] Известно [3] много таких корреляционных зависимостей, применяемых для практических целей. Особую трудность в выделении корреляционных связей представляют задачи, в которых на СР УВ влияет большое количество факторов, обусловленных структурными особенностями или свойствами материала. К таким задачам относятся выявление и практическое

использование корреляционной связи СР УВ с характеристиками, особенно триботехническими, многокомпонентных порошковых материалов. Большое количество исходных компонентов позволяет путём правильной их комбинации создавать материалы с требуемыми свойствами, однако существенно затрудняет прогноз предполагаемого результата. Поэтому создание методов оценки, в первую очередь неразрушающих, реальных свойств таких материалов в процессе их разработки представляет значительный интерес. Решение этих задач практически не представлено в литературе.

Цель работы: исследовать связь со СР УВ свойств и состава многокомпонентных порошковых материалов условно триботехнического назначения, у которых физико-механические характеристики исходных порошков существенно отличаются.

При исследовании применяли методологию [4], которая заключалась в решении следующих последовательных операций: анализ особенностей

объекта исследования и получение его свойств; статистическая обработка массива экспериментальных данных; анализ полученных результатов.

Объект исследования и его свойства. Объектом исследования выбраны многокомпонентные порошковые композиционные материалы, состоящие из металлической связки с неметаллическими включениями, значительно отличающимися по своим физико-механическим свойствам.

Металлическая связка выполнена на основе меди (80 объёмных % исходного порошка ПМС-1 по ДСТ 4960-75), легированной цинком (12, ПО1 по ДСТ 9723-73) и оловом (8, по ДСТ 12601-76Е). Медь за счёт высоких тепло- и электропроводности, пластичности и коррозионной стойкости является одним из основных антифрикционных материалов, а легирующие элементы увеличивают прочность, твёрдость и пластичность материала [5, 6]. Перемешивание частиц проводили по методике «пьяная бочка».

В качестве неметаллических включений использованы две традиционные для узлов трения твердые смазки [7]: карандашный графит или дисульфид молибдена. Они имеют малую твёрдость, защищают металлические поверхности от схватывания и, за счёт высокой теплопроводности, обеспечивают эффективный отвод тепла от поверхности трения. В качестве третьей твёрдой смазки использовали очищенный ультрадисперсный алмазный порошок размером до 50 нм (фирма «Алит») [8]. Алмаз обеспечивал высокие теплопроводность и прочность, низкий коэффициент трения. Размер порошка выбран на несколько порядков ниже уровня шероховатости поверхностей контакта пар трения, чтобы исключить возможность царапания контртела. Включение добавляли в количестве 3, 5, 6, 7 или 9 % от объема образца. Исходные порошки использовали в состоянии поставки. Включение перемешивали с матрицей вручную. Для улучшения контактообразования алмазный порошок предварительно смачивали раствором спирта с глицерином в соотношении 4:1.

Из приготовленной смеси порошков по технологии электроразрядного спекания изготовили образцы материалов размером 24x7x7 мм. Спекание проходило в тепло- и электроизоляционных асбестоцементных матрицах на установке "СТРУМ 901А" путём пропускания в течении 51 с через подпрессованную порошковую засыпку переменного электрического тока величиной 1800 – 2400 А и частотой 50 Гц. Окончательное давление 60 МПа. Малое время теплового воздействия на алмазный порошок позволило полностью сохранить его исходные свойства, а подпрессовка обеспечила удержание алмаза в связке. Изготовлены по 3 образца каждого вида. За счёт мягкости материала матрицы образцы приобретали разную высоту (в пределах $5,74 \leq h \leq 7,25$ мм) и, соответственно, пористость.

Таким образом, все образцы для исследований, хоть и изготовлены по одной технологии, но отличались составом (по 3 шт. одного состава),

высотой и пористостью, а образцы с алмазными включениями ещё и условиями контактообразования.

По стандартным методикам определены следующие свойства образцов:

- плотность (метод гидростатического взвешивания);
- пористость (сопоставление реальной и теоретической плотности [9]);
- предел прочности на изгиб на испытательной машине РМ-102 (ГОСТ 18228-94, ГОСТ 28840-90);
- твёрдость HRB по Роквеллу (ISO 6508-1);
- коэффициент трения и износ (ГОСТ 26614-85) при испытаниях 2 часа в масле с контртелом – Ст65Г, скоростью 10 м/с и нагрузкой 50 Н;
- СР УВ (метод радиоимпульса с дискретной задержкой [4] на частоте 5 МГц);
- динамический модуль упругости (по СР УВ [10]).

Результаты измерений и их анализ. Результаты экспериментальных исследований получены в виде таблиц со значениями указанных выше характеристик для каждого образца. Проведен упрощённый статистический анализ полученного массива данных в среде Excel 2013. Результаты анализа представлены на рис. в виде экспериментально полученных точек и соответствующих им линий тренда отдельно для каждого вида включений. Также на рисунки нанесены уравнения линий тренда и величина достоверности аппроксимации. Линии тренда и их достоверность отображают силу связи СР УВ с соответствующей характеристикой материала. Величина рассеяния экспериментальных точек указывает на силу влияния других, в данном случае мешающих, факторов.

При анализе полученных результатов априори исходили из того, что в соответствие известным [10] физическим представлениям на СР УВ в многокомпонентном порошковым материале влияют следующие факторы: акустические характеристики исходных порошков, а также их объёмное содержание, качество контактов между ними, наличие дефектов и пористость в полученном материале. Другие свойства материала тоже определяются соответствующими свойствами исходных порошков и теми же характеристиками структуры материала, однако, возможно, по-другому. Поэтому между различными свойствами материала может существовать корреляционная связь. Также считали, что, в условиях спекания, химического взаимодействия между исходными компонентами и включениями не происходило и новые фазы не образовались. Тогда, в соответствие рис. можно сказать следующее:

- влияние на СР УВ физических свойств показано на рис. д, е, а параметров структуры – рис. а, б;
- корреляционная связь СР УВ с механическими и триботехническими свойствами материала показана на рис. в, г и д, е, соответственно;
- со СР УВ связаны все рассматриваемые характеристики, но по-разному, в зависимости от вида самой характеристики и особенностей материала;
- значительное рассеяние экспериментальных точек на рис. а-д, ж, з свидетельствует, что на СР УВ влияют и другие факторы, кроме представленных на данном

рисунке. Поэтому при разработке метода контроля конкретного свойства по СР УВ необходимо использование специальных подходов для

абстрагирования от других влияющих факторов, например, с помощью их теоретической оценки [9] по известным [6] справочным данным;

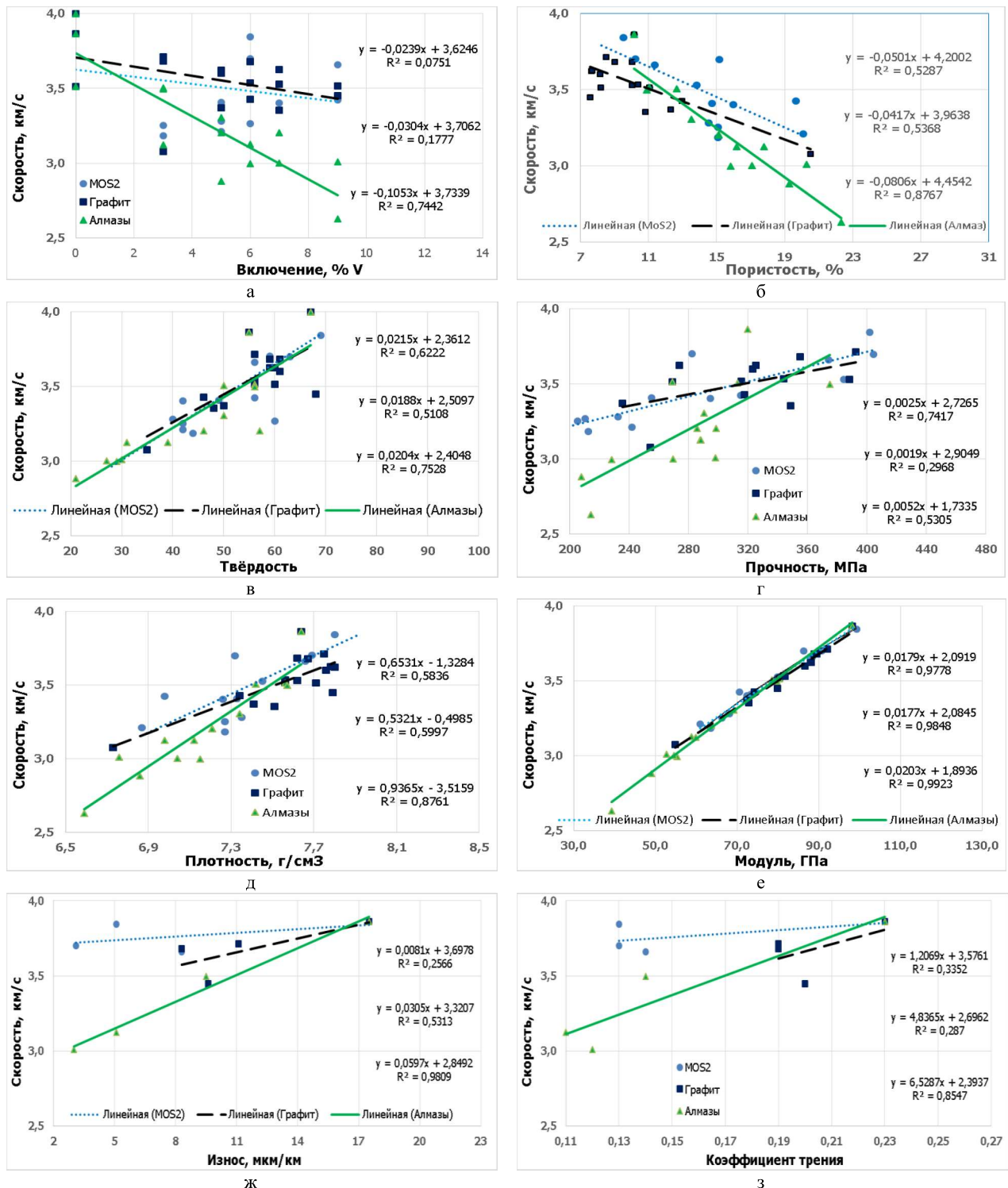


Рис. – Связь различных характеристик материала со скоростью распространения упругих волн

– наиболее тесно, как и следует из физических представлений, СР УВ связана с модулем упругости. Достоверность этой связи практически 100 %, что соответствует функциональной зависимости;
 – для всех характеристик наблюдается, по крайней мере, не меньшее влияние на СР УВ у материалов с

алмазными включениями, имеющими физико-механические свойства и свойства межчастичных контактов сильно отличающиеся от других включений. Наиболее чувствительны к этим факторам связи СР УВ с содержанием включений, прочностью, триботехническими свойствами;

– для твёрдости линии тренда практически совпали, т.к. при выбранном интегральном методе измерений на величину твёрдости отдельные частицы существенно не влияют.

Выводы. Результаты исследования показали, что использование скорости распространения упругой волны в многокомпонентных порошковых материалах на основе меди условно триботехнического назначения, у которых физико-механические характеристики исходных порошков существенно отличаются, перспективно не только для определения функционально связанных с ней модуля упругости и плотности материала, но и для разработки методов неразрушающей оценки корреляционно связанных с ней свойств материала таких как твёрдость, прочность, износ, коэффициент трения, а также параметров структуры (пористость, состав).

Эффективность использования таких методов оценки существенно зависит от физико-механических свойств исходных порошков и совместного влияния различных факторов. Поэтому, для её повышения, необходимо методику контроля адаптировать к особенностям состава материала путём проведения более детального статистического анализа и использования специальных подходов для абстрагирования от мешающих факторов.

Список литературы

1. Рохлин Л. Л. Акустические свойства легких сплавов. Москва: Наука, 1974. 140 с.
2. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. Москва: Машиностроение, 1983. 80 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
4. Безимьянный Ю. Г. Акустическое отображение материалов с развитой мезоструктурой // Акустичний вісник. – 2006. – Т. – 9. – № 2. – С. 3-16.
5. Косторнов А. Г. Триботехническое материаловедение. Луганск: Ноулидж, 2012. 702 с.
6. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

7. Федорченко И. М. Антифрикционные и фрикционные металлокерамические материалы // Порошковая металлургия. – 2002. – №9/10. – С. 53–55.
8. Лямкин А. И., Петров Е. А., Ершов Н. И. и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ // ДАН СССР. – 1988. – 302, №3. – С. 611–613.
9. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. Минск: Высшая школа, 1989. 182 с.
10. Безимьянный Ю. Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою. / Фізико-хімічна механіка матеріалів 2007. № 4. С. 53-65.

References (transliterated)

1. Rohlin L. L. Akusticheskie svoystva legkih metallov [Acoustic properties of light alloys]. Moscow, Nauka., 1979. 140 p.
2. Botaki A. A., Ulianov V. L., Sharko A. V. Ul'trazvukovoy kontrol' prochnostnykh svoystv konstrucciionnykh materialov [Ultrasonic testing of strength properties of structural materials]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 80 p.
3. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik [Non-destructive testing: Handbook]: V 8 t. / Rus. ed.: V.V.Klyuev. Vol.3: I.N.Ermolov, Yu.V.Lange. Ul'trazvukovoy kontrol' [Ultrasonic testing]. – Moscow, Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
4. Bezimyannyi Yu. G. Akusticheskoe otobrazhenie materialov s razvitoi mezostrukturoy [Acoustic mapping of materials with developed mesostructure] // Akustichnyy visnyk [Acoustic messenger]. – 2006. – Vol. – 9. – No 2. – pp. 3-16.
5. Kostornov A. G. Tribotekhnicheskoe materialovedenie [Tribotechnical Materials Science]. Lugansk: Noulidsh, 2012, 702 p.
6. Fizicheskie velichiny. Spravochnik [Physical Values: Handbook]. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p.
7. Fedorchenko I. M. Antifriccionnyy i friccionnyye metallokeramicheskie materialy [Antifriction and friction metal-ceramic materials]. Poroshkovaya metallurgiya [Powder Metallurgy]. Kiev, 2002, No. 9/10, pp. 53–55
8. Liyamkin A. I., Petrov E. A., Ershov N. I. Polucheniealmazov iz vzyrychatykh veschestv [Obtaining diamonds from explosives]. DAN USSR, 1988, 302, No. 3, pp. 611-613
9. Roman O V., Skorohod V. V., Fridman G. R. Ul'trazvukovoy I rezistometricheskii kontrol' v poroshcovoy metallurgii [Ultrasonic and resistometric control in powder metallurgy]. Minsk, Vyssh. Sc., 1989, 182 p.
10. Bezimyannyi Yu. G. Akustichnyy kontrol' materialiv z rozvynutoi mezostrukturoy [Acoustic control of materials with a mesostructured rosette]. Lviv, Fyzyko-himichna mehanika materialiv., 2007, No. 4, pp. 53-65.

Надійшла (received) 05.07.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Безимьянный Юрій Георгійович (Безымянный Юрий Георгиевич, Bezimyannyi Yuriy Georgievych) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>; e-mail: bezimyni@i.com.ua

Висоцький Андрій Миколайович (Высоцкий Андрей Николаевич, Vysotskyi Andriy Mykolayovych) – здобувач, головний технолог, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>; e-mail: driver5@ukr.net

Істоміна Тетяна Іванівна (Истомина Татьяна Ивановна, Istomina Tatyana Ivanovna) – науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1825-0088>; e-mail: edsgroup@gmail.com