

**Ю. Г. БЕЗИМЯННИЙ, А. М. ВИСОЦЬКИЙ, А. М. КОЛЕСНИКОВ, К. А. КОМАРОВ,
В. А. НАЗАРЕНКО, В. П. СОЛНЦЕВ**

ОСОБЛИВОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗА ЗМІНОЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ МАТЕРІАЛУ ДО І ПІСЛЯ ПРОКАТКИ

Розглянуто задачу забезпечення достовірності та інформативності контролю властивостей матеріалу за результатами ультразвукових вимірювань в зразках у вигляді товстих стрижнів, у яких змінюються геометричні розміри після прокатки. Задача виникає в порошковій металургії при відпрацюванні технології створення матеріалів із заданими властивостями, яка включає в себе на одній із стадій прокатку. На прикладі зразків зі сплавів алюмінію і заліза проведено аналіз закономірностей формування та зміни акустичного поля в цих зразках. Відзначено, що істотним фактором, який впливає на ці закономірності є ефект трансформації пружних хвиль на поверхні зразка. Не урахування цього ефекту може призвести до промахів при ультразвукових вимірюваннях і, як наслідок, – до недостовірності відображення динаміки змін властивостей матеріалу при зміні розмірів зразка. Для підвищення інформативності контролю необхідно адаптувати зондувальний сигнал і обробку приймального сигналу до особливостей формування акустичного поля.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, пружні хвилі, порошкові матеріали, товсті стрижні, прокатка, акустичне поле.

**Ю. Г. БЕЗЫМЯННИЙ, А. Н. ВЫСОЦКИЙ, А. Н. КОЛЕСНИКОВ, К. А. КОМАРОВ,
В. А. НАЗАРЕНКО, В. П. СОЛНЦЕВ**

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛА ДО И ПОСЛЕ ПРОКАТКИ

Рассмотрена задача обеспечения достоверности и информативности контроля свойств материала по результатам ультразвуковых измерений в образцах в виде толстых стержней, в которых изменяются геометрические размеры после прокатки. Задача возникает в порошковой металлургии при отработке технологии создания материалов с заданными свойствами, включающей в себя на одной из стадий прокатку. На примере образцов из сплавов алюминия и железа проведен анализ закономерностей формирования и изменения акустического поля в таких образцах. Отмечено, что существенным фактором, влияющим на эти закономерности, является эффект трансформации упругих волн на поверхности образца. Не учёт этого эффекта может привести к промахам при ультразвуковых измерениях и, как следствие, – к недостаточности отображения динамики изменения свойств материала при изменении размеров образца. Для повышения информативности контроля необходимо адаптировать зондирующий сигнал и обработку приемного сигнала к особенностям формирования акустического поля.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, упругие волны, порошковые материалы, толстые стержни, прокатка, акустическое поле.

**Yu. G. BEZIMYANNIY, A. M. VYSOTSKY, A. M. KOLESNIKOV, K. A. KOMAROV, V. A. NAZARENKO,
V. P. SOLNTSEV**

PECULIARITIES OF ULTRASONIC INSPECTION ON THE CHANGES IN THE PROPERTIES OF SAMPLE MATERIAL BEFORE AND AFTER ROLLING

The problem of providing reliability and informativeness of inspection on the changes in material properties based on the ultrasonic measurements in the samples in the form of thick bars which change their geometric dimensions after rolling is considered. The problem appears in powder metallurgy in the course of developing the technology for creation of the material with given properties including rolling at one of the stages. As an example, the samples made from aluminum alloys and steel are taken and the peculiarities of formation and changes of acoustic field in such samples are analysed. It is noticed that the significant factor affecting the peculiarities is effect of elastic wave transformation on the sample surface. If the effect is not considered, measurement miss at ultrasonic measurements may appear and, as a result, inaccurate display of dynamics of material property changes with changing the sample dimensions may be obtained. To improve informativeness of inspection, it is necessary to adapt a probing signal and receiving signal processing to the peculiarities of acoustic field formation.

Key words: ultrasonic inspection, elastic waves, powder materials, thick bars, rolling, acoustic field.

Вступ. При розробці нових матеріалів, які виготовляють методами порошкової металургії, для забезпечення заданих властивостей у кінцевому виробі важливо правильно вибрати параметри технологічних режимів на різних стадіях обробки його напівфабрикатів. [1] У другій половині минулого сторіччя було поставлене питання про необхідність розробки неруйнівних ультразвукових (УЗ) методів, які дозволяють контролювати динаміку зміни властивостей порошкового матеріалу після кожної стадії. [2] Ефективне використання УЗ методів передбачає адаптацію їхніх параметрів до умов вимірювання, які можуть змінюватися в процесі виготовлення матеріалу. [3]

У порошковій металургії прокатка є типовою операцією тільки на стадії формування порошків [4], але в останні роки для отримання матеріалів з особливими фізико-механічними властивостями її стали включати на стадії додаткової обробки

напівфабрикатів [5]. В результаті прокатки суттєво змінюються не тільки властивості матеріалу, але й геометричні розміри його зразків. [5] Останнє призводить до змін акустичного поля у зразку матеріалу і тому, при використанні типових методик УЗ вимірювань [6], може призвести до промахів визначення параметрів пружної хвилі і неадекватному відображенні динаміки зміни властивостей матеріалу в результаті прокатки. Проведений нами літературний пошук не виявив моделювання цього процесу, методики вимірювань чи будь-яких рекомендацій для отримання коректних результатів у таких випадках.

Метою роботи є розробка принципів ультразвукових вимірювань у зразках порошкових матеріалів до і після прокатки для забезпечення за їхніми результатами адекватного відображення динаміки зміни властивостей матеріалу.

Для досягнення поставленої мети застосовували методологію обґрунтованого синтезу й оптимізації

методів контролю [3], яка, у нашому випадку, полягала в розв'язанні наступних послідовних операцій: аналіз особливостей формування акустичного поля в об'єкті в умовах задачі контролю; розробка вимог до УЗ вимірювань; перевірка запропонованих рекомендацій на реальному об'єкті; аналіз отриманих результатів; висновки.

Особливості формування акустичного поля в об'єкті контролю. Вимоги до ультразвукових вимірювань. Відпрацювання технології виготовлення нових матеріалів з використанням прокатки проводять на зразках у вигляді товстих стрижнів з прямокутним перетином (див. рис. 1) [5].

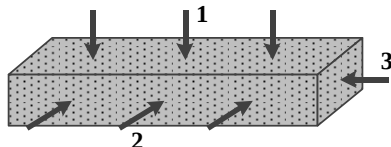


Рис. 1 – Форма зразків для досліджень та напрямів їх прозвучування

Зв'язок характеристик пружних хвиль (швидкість поширення та коефіцієнт згасання) з властивостями порошкових матеріалу (характеристики пружності, непружності, пористість, дефектність, ступінь анізотропії, нерівномірність розподілу властивостей за об'ємом, тощо) наданий у [3]. Прозвучування зразка у різних напрямках (рис. 1) різними пружними хвилями дає можливість отримати комплексну інформацію про матеріал [7].

За допомогою апаратного комплексу для прецизійних акустичних вимірювань [8] було проведено дослідження акустичних полів (див. рис. 2), сформованих за різними напрямками таких зразків у матеріалах із сталі та дюралюмінію (див. табл. 1) при їхньому зондуванні періодичним імпульсом поздовжніх пружних хвиль тривалістю 1 мкс та заповненням частотою 4 МГц. Вибір тривалості імпульсу дає можливість розділити важливі елементи акустичного поля, а частота – сформувати радіоімпульс із вузькою смугою частот.

Таблиця 1 – Дослідження акустичних полів, сформованих за різними напрямками зразків

Зразок				h/λ_1	t_t/T_1	Рис. 2
№	Матеріал	Розміри, мм	Напрямок			
1	дюралюміній	97 x 25 x 5	1, 2, 3	3,2	5,7	а, б, в
2	дюралюміній	48 x 25 x 5	3	3,2	5,7	г
3	дюралюміній	27 x 25 x 5	3	3,2	5,7	д
4	сталь	56 x 25 x 5	3	3,5	5,3	е
5	сталь	45 x 25 x 10	3	7,0	10,6	є
6	сталь	100 x 20 x 3,5	3	2,5	3,7	ж

За результатами аналізу наведених осцилограм можна сказати наступне.

За напрямом 1 (див. рис. 2 а) акустичне поле формується поздовжніми пружними хвилями, які багаторазово відбиваються від верхньої та нижньої поверхонь зразка. Вимірювання відстані у часі між сусідніми імпульсами дає змогу визначати за відомими методиками [6] швидкість поширення

поздовжньої пружної хвилі (V_1), а вимірювання зменшення амплітуди – згасання (α_1).

За напрямом 3 (див. рис. 2 в) акустичне поле формується пружними хвилями, які трансформуються на верхній і нижній поверхнях з поздовжньої у поперечну та навпаки [9]. При цьому перший імпульс відповідає поздовжній хвилі, яка пройшла зразок наскрізь, а кожний наступний імпульс затримується на величину [10]

$$t = T_1 \cdot [(V_1/V_t)^2 - 1]^{1/2} \cdot h/\lambda_1$$

де h – товщина зразка;

T_1 – період коливань поздовжньої пружної хвилі;

V_1 та V_t – швидкості поширення поздовжньої та поперечної пружних хвиль;

λ_1 – довжина поздовжньої пружної хвилі.

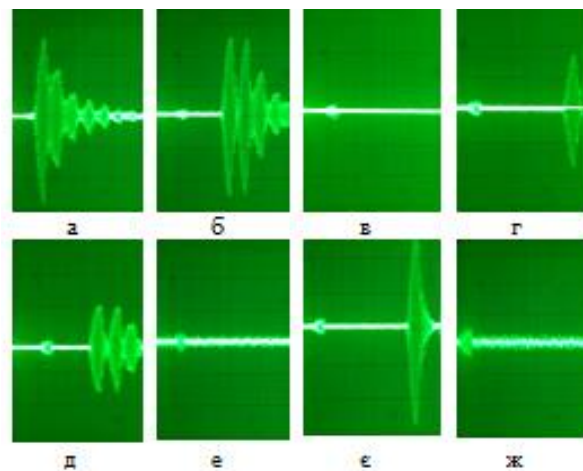


Рис. 2 – Осцилограми акустичних полів у зразках відповідно табл. 1

При трансформації хвиль на всій довжині зразка проходить перекачування енергії з першого імпульсу у другий, з другого у третій і т.д. Тому з відстанню неперервно, аж до самого нуля, зменшується амплітуда першого імпульсу та зростає наступних (див. рис. 2 д, г, в), що не дає змоги визначати V_1 за відомими методиками [6]. Вимірювання згасання за амплітудами сигналів втрачає сенс. Значення t_t не змінюється при різних довжинах зразків, тому, відповідно наведеній формулі, з'являється можливість додаткового визначення V_t за результатами вимірювання t_t .

За напрямом 2 (див. рис. 2 б) діють обидва вказаних вище механізми формування акустичного поля. Видно, що, після першого відбиття, амплітуда першого імпульсу суттєво зменшується, а, після другого практично зникає. Тут за спеціальними методиками можна визначати V_1 і V_t та нема сенсу – α_1 .

Розглянемо особливості формування акустичного поля за механізмом трансформації. З наведеної вище формули видно, що на цей процес впливають: стала величина для даного матеріалу, пов'язана з його властивостями (складова у [...], яка дорівнює 1,77 для дюралюмінію та 1,51 – для сталі); хвиловий розмір висоти зразка (h/λ_1) та параметр зондувального сигналу (T_1).

Дійсно, з рис. 2 в та є бачимо, що в сталі процес трансформації хвиль проходить швидше.

Вплив хвильового розміру показано на рис. 2 ж. Збільшення хвильового розміру призводить до суттєвого зростання t_t порівняно з T_1 (див. табл. 1). Для вибраних параметрів зондувального сигналу виокремлення сусідніх імпульсів можливе за умов $t_t/T_1 \geq 4$. Це видно з рис. 2 ж, де кінці імпульсів накладаються вже при $t_t/T_1 = 3,7$, але самі імпульси ще розрізняються за максимальними амплітудами. При подальшому зменшенні t_t/T_1 поздовжня пружна хвиля в напрямках 2 та 3 перероджуються в нульову симетричну хвилю із швидкістю поширення V_L , яка вимірюється за іншою методикою Лемба [9] та має інший зв'язок із властивостями матеріалу [6].

Відповідно до визначених особливостей формування акустичних полів у зразках у вигляді товстих стрижнів з прямокутним перетином слід надати такі рекомендації для отримання за результатами УЗ вимірювань комплексної інформації про динаміку зміни властивостей матеріалу до і після прокатки зразка:

– для отримання максимальної інформації про матеріал необхідно провести до і після прокатки прозвучування його зразка у всіх напрямках (див. рис. 1), вибравши параметри зондувального сигналу такі, щоб забезпечити виокремлення інформативних імпульсів акустичного поля для визначення V_L , V_t та α ;

– зміна товщини зразка в результаті прокатки з-за зменшення першого імпульсу може привести до промахів при вимірюванні часу приходу поздовжньої хвилі за напрямками 2 та 3 на T_1 чи, навіть, t_t . При неможливості у прийнятному тракті виявлення на фоні перешкод першого періоду, чи усього першого імпульсу, для усунення промахів необхідно врахувати це при визначенні V_L ;

– якщо за напрямками 2 чи 3 неможливо визначити V_L , треба перейти до визначення V_L із відповідним врахуванням властивостей матеріалу для адекватного відображення їхніх змін в результаті прокатки.

Визначення впливу прокатки на швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі у порошковому матеріалі. Розроблені рекомендації було використано для дослідження динаміки змін властивостей порошкового матеріалу 73Ni-20Cr-6Al-1Y₂O₃ в результаті прокатки. До прокатки зразок мав розміри 49,7x8,3x4,7, а після – 54,6x9,0x3,6 мм. Акустичне поле дозволяло вимірювати V_L за всіма напрямками (див. рис. 1) та V_t – за напрямом 1. Вимірювання та відповідні розрахунки показали, що після прокатки змінилася (на 9 %) тільки V_L за напрямом 3. Усі інші характеристики акустичного поля залишилися незмінними. Отриманий результат пояснюється появою текстури в матеріалі зразка після прокатки.

Висновки. В результаті дослідження особливостей формування акустичного поля в різних напрямках зразка у вигляді товстого стрижня з прямокутним перетином показано, що ультразвукові

вимірювання забезпечують адекватне відображення змін властивостей матеріалу в результаті прокатки лише за умови врахування при виборі параметрів зондувального та методики обробки прийнятого сигналів впливу механізму трансформації пружних хвиль на поверхні зразка. Неврахування цього впливу може привести до суттєвих промахів при вимірюванні характеристик акустичних полів і, як результат, некоректному відображенню змін властивостей матеріалу після пресування.

Список литературы

1. Степанчук А. Н. Порошковая металлургия. // Неорганическое материаловедение энциклопедич. изд. / Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода в 2-х т. – Т.2. – Кн.2. – 2008 – С.104–114.
2. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. Минск: Высшая школа, 1989. – 182 с.
3. Безимьянный Ю. Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою // Фізико-хімічна механіка матеріалів 2007. № 4. – С.53–65.
4. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов в 2-х т. – Киев. Наукова думка. – 2012. – 569 с.
5. Solntsev V. Development of rolling modes for samples made from nichrome powder alloy and their testing at operating temperatures [Текст] / V. Solntsev, G. Frolov, L. Kravchuk, V. Nazarenko, I. Bilan, K. Petrash, I. Husarova, F. Potapov // International scientific journal "Machines. Technologies material". – Sofia. – 2017. – P. 254–257.
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.
7. Безимьянный Ю. Г., Козирацкий Е. А., Бродниковский Н. П., Талько О. В. Акустический неразрушающий контроль многокомпонентного сплава на основе ниобия // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. Прилади та методи контролю та визначення складу речовин. – 2015. – № 19. – С. 119–126.
8. Безимьянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5/6.
9. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М., Машиностроение, 1981. 240 с.
10. Безимьянный Ю. Г., Вдовиченко А. В., Кузьменко В. А. Некоторые результаты акустических исследований материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии: Препринт – Киев: ИПМ НАНУ, 1994. – 63 с.

References (transliterated)

1. Stepanchuk A. N. Poroshkovaya metallurgiya // Neorganicheskoe materialovedenie enciklopedich.izd / Pod red. G. G. Gnesina, V. V. Skorohoda v 2-h t. – Kn.2. – 2008 – PP.104-114.
2. Roman O V., Skorohod V. V., Fridman G. R. Ul'trazvukovoy I rezistometricheskii kontrol' v poroshkovoy metallurgii [Ultrasonic and resistometric control in powder metallurgy]. Minsk, Vyssh. Sc., 1989, 182 p.
3. Bezmyannyy Yu. H. Akustychnyy kontrol' materialiv z rozvynutoyu mezostrukturoyu [Acoustic control of materials with developed mesostructure] // Fizyko-khimichna mekhanika materialiv [Physical-chemical mechanics of materials] 2007. No 4. P. 53–65.
4. Kostornov A. G. Materialovedenie dispersnyh i poristyh metallov i spлавov v 2-ht. – Kiev, Naukova dumka – 2012. – 569 p.
5. Solntsev V. Development of rolling modes for samples made from nichrome powder alloy and their testing at operating temperatures [Текст] / V. Solntsev, G. Frolov, L. Kravchuk, V. Nazarenko, I. Bilan, K. Petrash, I. Husarova, F. Potapov // International scientific journal "Machines. Technologies material". – Sofia. – 2017. – P. 254–257.
6. Nerazrushayushchiy kontrol: Spravochnik [Nondestructive testing: guide]: In 8 volumes / Ed. V. V. Klyuev. Vol. 3: I. N. Ermolov,

- Yu. V. Lange. Ultrazvukovoy control [Ultrasonic testing]. – 2nd ed., fixed. – Moscow: Mashinostroenie, 2006. – 864 p.
7. Bezimyanny Yu. G., Kozirackiy E. A., Brodnikovskiy N. P., Talko O. V. Akusticheskiy nerazrushayushiy kontrol mnogokomponentnogo splava na osnove niobiya / // Visnyk Nacionalnogo tehniknogo universitetu "HPI". Seriya : Elektroenergetyka ta peretvoruvalna tehnika Prylady ta metody kontroly ta vyznachennya skladu rehovyn. – 2015 – No 19 – pp. 119–126.
 8. Bezimyannyi Yu. G. Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv poristykh materialov [Possibilities of acoustic methods at control of structure and физико-механических properties of porous materials]// Poroshkovaya metallurgiya. – 2001. – No 5/6.
 9. Ermolov I. N. Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 240 p.
 10. Bezimyanny Yu. G., Vdovichenko A. V., Kuzmenko V. A. Nekotorye rezultaty akusticheskikh issledovaniy materialov, izgotovlyayemykh metodami poroshkovoy metallurgii. Preprint – Kiev: IPM NANU, 1994. – 63 p.

Надійшла (received) 05.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Безимяний Юрій Георгійович (Безимянный Юрий Георгиевич, Bezimyanny Yuriy Georgievich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувачий лабораторією, ІПМ НАНУ; м. Київ, Україна; e-mail: bezimyni@gmail.com

Висоцький Андрій Миколайович (Висоцкий Андрей Николаевич, Vysotskiy Andriy Mykolayovych) – головний технолог, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: driver5@ukr.net

Колесников Анатолій Миколайович (Колесников Анатолий Николаевич, Kolesnikov Anatoliy Mykolayovych) – науковий співробітник, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: semafor@ukr.net

Комаров Костянтин Андрійович (Комаров Константин Андреевич, Komarov Kostyantyn Andriyovych) – науковий співробітник, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: ko17con@gmail.com

Назаренко Володимир Андрійович (Назаренко Владимир Андреевич, Nazarenko Volodymyr Andriyovych) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: vanazarenko@gmail.com

Солнцев Віктор Петрович (Солнцев Виктор Петрович, Solntsev Viktor Petrovych) – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: bezimyni@gmail.com