
II. Результати наукових досліджень

УДК 621.762: 620.179.16

**Ю.Г. Безимянный, Є.О. Козирацький, К.А. Комаров,
В.П. Солнцев, О.В. Талько**

ПОСТАДІЙНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ КОНТРОЛЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ Ni

Безимянный Юрій Георгійович – доктор технічних наук, завідувач лабораторії, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, otdel57@ipms.kiev.ua

Козирацький Євген Олександрович – молодший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, otdel57@ipms.kiev.ua

Комаров Костянтин Андрійович – науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, otdel57@ipms.kiev.ua

Солнцев Віктор Петрович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, solntcevvp@gmail.com

Талько Оксана Вікторівна – молодший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, otdel57@ipms.kiev.ua

Розглянуто задачу поетапного контролю властивостей матеріалу на основі порошків Ni-Cr-Al-Y₂O₃ за результатами вимірювань швидкості поширення пружних хвиль. Задача виникає в порошковій металургії при відпрацюванні технології створення нових матеріалів. Адекватне відображення динаміки зміни властивостей матеріалу з використанням ультразвукових методів ускладнене зміною умов вимірювання від стадії до стадії і тому потребує поетапної адаптації методів контролю до цих змін. Розв'язання такої задачі не описано у літературі. Проведено аналіз закономірностей формування й зміни акустичного поля на різних стадіях впливу на матеріал, поставлений акустичний експеримент та досліджено динаміку змін різних швидкостей поширення пружних хвиль в процесі формування матеріалу. Показано ефективність комплексного використання різних швидкостей поширення пружних хвиль для розв'язання цієї задачі.

***Ключові слова:** порошкова металургія, неруйнівний контроль, швидкість поширення пружної хвилі, акустичне поле, анізотропія.*

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]

Швидкість поширення пружних хвиль має функціональний чи емпіричний зв'язок з такими властивостями порошкового матеріалу, як характеристики пружності, пористість, якість міжчастинкових контактів, дефектність, ступінь анізотропії, нерівномірність розподілу властивостей за об'ємом, тощо. Це дає

можливість оцінювати перелічені властивості матеріалу за результатами ультразвукових вимірювань.

Проблему розробки неруйнівних ультразвукових методів, які б дозволяли контролювати динаміку зміни властивостей порошкового матеріалу після кожної стадії, було поставлено ще у другій половині минулого сторіччя. [2] Умови вимірювань можуть суттєво змінюватися від стадії до стадії. Неврахування цих змін призводить до промахів при контролі і, як наслідок, неадекватного відображення властивостей матеріалу. Стандартні методи [3] не дозволяють вирішити цю проблему. Нами розроблена [4] і постійно удосконалюється [5, 6] методологія підвищення ефективності використання ультразвукових методів при контролі властивостей матеріалу після типових стадій порошкової металургії, яка полягає в адаптації параметрів цих методів до умов вимірювання з урахуванням їхніх змін в процесі виготовлення матеріалу.

В цій роботі методологію було застосовано для поетапного ультразвукового контролю динаміки змін властивостей матеріалу на основі порошків Ni-Cr-Al-Y₂O₃. У нашому випадку методологія полягала в розв'язанні наступних послідовних операцій:

- аналіз особливостей об'єкта контролю на різних стадіях формування матеріалу;
- аналіз особливостей формування акустичних полів у зразках та постановка акустичного експерименту;
- отримання та аналіз результатів;
- висновки.

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ

Для досліджень шляхом спікання при температурі 1250 °С й охолодження з піччю в вакуумі були отримані з порошків Ni-Cr-Al-Y₂O₃ два зразки матеріалу (табл. 1) у вигляді стрижнів з прямокутним перетином (рис. 1).

Таблиця 1

Вихідні дані зразків для досліджень

| Зразок № | Вміст, % | | | | Розміри, мм | | | | | | |
|----------|----------|------|------|-------------------------------|-------------|-----------|-------|--------|-----------|-------|--------|
| | Ni | Cr | Al | Y ₂ O ₃ | Довжина, l | Ширина, b | | | Висота, h | | |
| | | | | | | Край 1 | Центр | Край 2 | Край 1 | Центр | Край 2 |
| 1 | 73,05 | 20,0 | 5,95 | 1,0 | 49,65 | 8,32 | 8,27 | 8,32 | 4,58 | 4,46 | 4,27 |
| 2 | 72,8 | 20,0 | 5,7 | 1,5 | 49,15 | 9,6 | 9,71 | 9,74 | 4,53 | 4,48 | 4,35 |

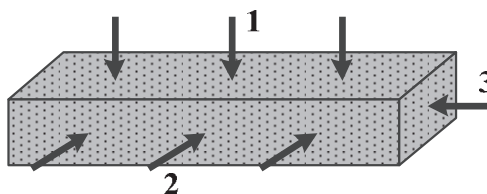


Рис. 1. Форма зразків для досліджень та напрями їх прозвучування

Аналіз розмірів зразка (табл.1) показав, що вони змінюються по ширині в межах 2, а по висоті – 6 %.

Для відпрацювання технології виготовлення матеріалу в подальшому зразки послідовно відпалювали при температурах 800, 900, 1000 та 1200 °С, прокачували (зразок 1 на 19,6, а зразок 2 – 13 %) і знов відпалювали при температурах 600, 800, 1000 та 1250 °С (табл. 2).

Таблиця 2

Стадії впливу на зразки та їхні наслідки

| Стадія № | Технологічний процес | | Зміни, % | |
|----------|------------------------|-------------|---------------|-------------|
| | Відпал, °С | Прокатка, % | Розміри | Властивості |
| 1 | Вихідні характеристики | | Табл.1 | Вихідні |
| 2 | 800 | – | – | – |
| 3 | 900 | – | – | – |
| 4 | 1000 | – | – | – |
| 5 | 1100 | – | – | – |
| 6 | 1200 | – | – | – |
| 7 | - | 19,6/13,2 | -25/20; +9/10 | ≤10 |
| 8 | 600 | – | – | ≤2 |
| 9 | 800 | – | – | ≤2 |
| 10 | 1000 | – | – | ≤4 |
| 11 | 1250 | – | – | ≤6 |

Розміри зразків після прокатки наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Розміри зразків після прокатки

| Зразок № | Розміри, мм | | | | | | |
|----------|-------------------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | Довжина, <i>l</i> | Ширина, <i>b</i> | | | Висота, <i>h</i> | | |
| | | Край1 | Центр | Край2 | Край1 | Центр | Край2 |
| 1 | 49,65 | 8,32 | 8,27 | 8,32 | 4,58 | 4,46 | 4,27 |
| 2 | 49,15 | 9,6 | 9,71 | 9,74 | 4,53 | 4,48 | 4,35 |

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ПОЛІВ ТА ПОСТАНОВКА АКУСТИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Після кожної стадії впливу на матеріал на базі апаратного комплексу для прецизійних акустичних вимірювань [7] зразки досліджували імпульсним та резонансним ультразвуковими методами. Для отримання комплексної інформації про матеріал зразки прозвучували у різних напрямках (рис. 1) різними пружними хвилями [8]: за довжиною вимірювали швидкості поширення поздовжньої, стрижньової та нормальної симетричної пружних хвиль; за шириною – швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі; за висотою – швидкості поширення поздовжньої та поперечної пружних хвиль. Для отримання інформації про якість технологічної операції зразки за висотою та товщиною додатково прозвучували в трьох місцях довжини (рис. 1).

Акустичні поля у кожному напрямку мають свої особливості, обумовлені властивостями матеріалу та геометрією зразків (рис. 2). Ці особливості можуть змінюватися від стадії до стадії (рис. 2 в, г). Тому для забезпечення коректних результатів вимірювання та підвищення інформативності результатів при використанні імпульсного методу у кожному випадку були розроблені оригінальні методики вимірювань, пов'язані з вибором виду зондувального сигналу і його параметрів, а саме, періоду слідування, тривалістю й частотою заповнення, та обробкою прийнятих сигналів. Ці методики адаптовані до особливостей формування акустичних полів для певного виду пружної хвилі за певним напрямком з урахуванням особливостей структури матеріалу [6] і дозволяли вимірювати час поширення пружних хвиль з похибкою не більше 0,5 %.

Швидкість поширення пружної хвилі розраховували за формулою:

$$C = \frac{s}{t_u - t_n} \quad (1)$$

де *s* – шлях пружної хвилі у зразку; *t_u* – вимірюваний час, *t_n* – похибка вимірювань.

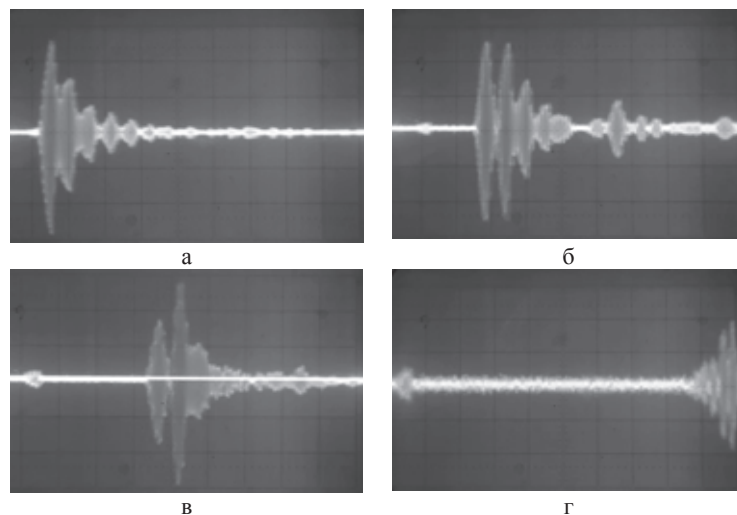


Рис. 2. Осцилограми акустичних полів у зразках за різними напрямками: а – за товщиною; б – за шириною; в – за довжиною до і г – після прокатки

РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Результати вимірювання у вигляді динаміки зміни відповідної швидкості поширення пружної хвилі від стадії до стадії наведені на рис. 3 та 4. У легенді до рисунків зазначені напрями вимірювань відповідно до рис.1 та вид пружної хвилі, яку було використано для цих вимірювань.

З рис. 3 та 4 видно, що наведені залежності не мають принципових відмінностей між обома дослідженими зразками. При цьому швидкість поширення поперечної пружної хвилі практично не змінюється від стадії до стадії. Останнє пояснюється недостатньо високою для забезпечення необхідної чутливості до змін властивостей матеріалу частотою, яка може бути використана для вимірювань на цій хвилі.

Для більш детального аналізу змін при використанні поздовжніх та стрижньових пружних хвиль результати вимірювання у зразку 1 наведені у іншому масштабі (рис. 5, легенда та сама).

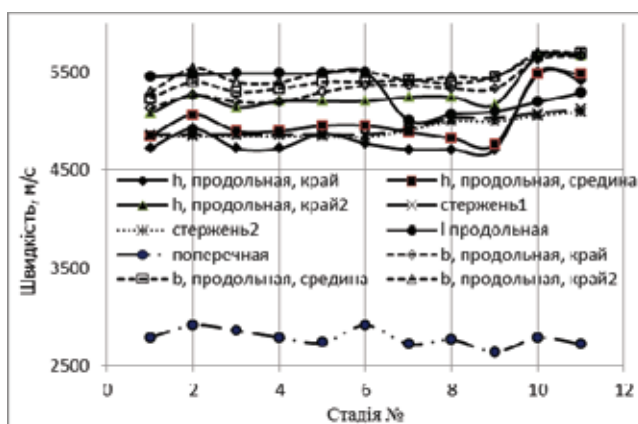


Рис. 3. Результати вимірювання у зразку 1

Аналіз результатів вимірювання дозволив зробити такі висновки:
 – до прокатки матеріалу величини усіх виміряних швидкостей поширення пружних хвиль практично не змінювалися, а їхні коливання від стадії до

II. РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

- стадії лежали у межах похибок вимірювання. Це вказує на те, що відпалювання на цих стадіях не впливало на властивості матеріалу. Значення цих величин відповідає гексагональній анізотропії матеріалу;
- після прокатки величина швидкості поширення поздовжніх пружних хвиль за довжиною зменшилася на 10 %, тоді як інші практично не змінилися, що відповідає переходу матеріалу до ромбічної анізотропії властивостей;
 - при подальшому відпалюванні величини усіх швидкостей поширення пружних хвиль почали змінюватися, але по-різному. Це вказує на зміну ступеня анізотропії матеріалу на кожній стадії із переходом практично в ізотропне тіло на останніх двох стадіях;
 - вимірювання у різних місцях показало нерівномірність властивостей за об'ємом зразка, яке практично зникає на останніх двох стадіях.

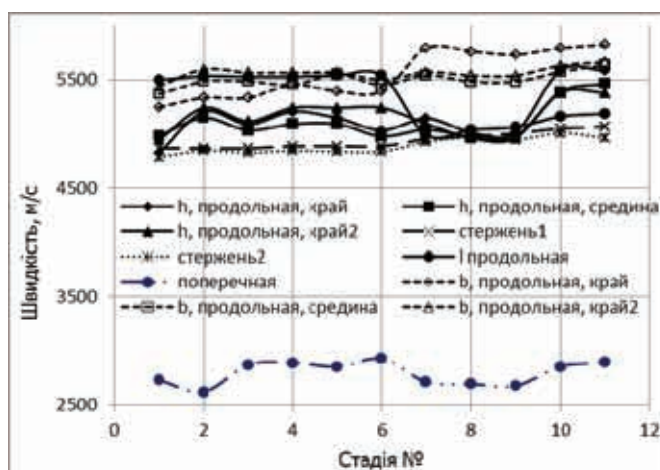


Рис. 4. Результати вимірювань у зразку 2

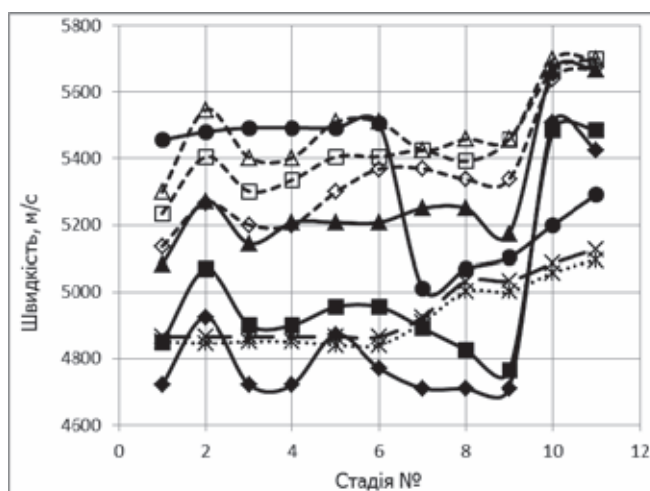


Рис. 5. Результати вимірювань у зразку 1 для поздовжніх та стрижньових хвиль

ВИСНОВКИ

Ультразвукові дослідження дозволили показати поетапну динаміку зміни властивостей багатофазних порошкових матеріалів на основі порошоків Ni-Cr-Al-Y₂O₃ за результатами вимірювання швидкостей поширення пружних хвиль.

Подальший розвиток роботи може бути пов'язаний з дослідженням постадійної динаміки зміни фізико-механічних властивостей матеріалу, які мають функціональний чи емпіричний зв'язок зі швидкостями поширення пружних хвиль таких як характеристики пружності та ін.

Рассмотрена задача постадийного контроля свойств материала на основе порошков Ni-Cr-Al-Y₂O₃ по результатам измерений скорости распространения упругих волн. Задача возникает в порошковой металлургии при отработке технологии создания новых материалов. Адекватное отображение динамики изменения свойств материала с использованием ультразвуковых методов усложнено изменением условий измерения от стадии к стадии и потому нуждается в поэтапной адаптации методов контроля к этим изменениям. Решение такой задачи не описано в литературе. Проведен анализ закономерностей формирования и изменения акустического поля на разных стадиях воздействия на материал, поставлен акустический эксперимент и исследована динамика изменений разных скоростей распространения упругих волн в процессе формирования материала. Показана эффективность комплексного использования разных скоростей распространения упругих волн для решения этой задачи.

Ключевые слова: порошковая металлургия, неразрушающий контроль, скорость распространения упругой волны, акустическое поле, анизотропия.

The task of stage-by-stage control by properties of powders material with components Ni-Cr-Al-Y₂O₃ is considered. The control is based on results measuring of speed elastic waves. A task arises up in powder metallurgy at working off technology of new materials creation. The adequate reflection of dynamics of material properties change with the use of ultrasonic methods is complicated by the change of measuring conditions from the stage to the stage and that is why needs stage-by-stage adaptation of control methods to these changes. The decision of such task is not described in literature. The analysis of conformities to law of forming and change of the acoustic field is conducted on the different stages of influence on the material put acoustic experiment and the dynamics of changes of different speeds waves distribution is investigational in the process of forming of material. Efficiency of the complex use of different speeds waves distribution is shown for the decision of this task.

Key words: powder metallurgy, non-destructive testing, elastic wave speed, acoustic field, anisotropy.

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. 182с.
3. 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. – 864с.
4. Безмянный Ю. Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. -№ 4. – С.53-65.
5. Безмянный Ю.Г., Козирацкий Е.А., Назаренко В.А., Тесленко Л.О. Особенности акустических измерений в прессовках на основе порошка титана. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*. 2019.- № 1. С.3-6.
6. Безмянный Ю.Г., Висоцький А.М., Колесников А. М., Комаров К.А., Назаренко В.А., Солнцев В.П. Особенности ультразвукового контролю за зміною властивостей зразків матеріалу до і після прокатки. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*, 2019.- № 1. – С.7-10.
7. Безмянный Ю.Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001.- № 5/6.
8. Безмянный Ю. Г., Козирацкий Е. А., Бродниковский Н. П., Талько О.В. Акустический неразрушающий контроль многокомпонентного сплава на основе ниобия // *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*, 2015. – № 19. – С.119-126.