

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, д-р техн. наук, зав. отд.,

ИПМ НАН Украины, Киев;

Е. А. КОЗИРАЦКИЙ, соискатель, м.н.с., ИПМ НАН Украины,

Киев;

Н. П. БРОДНИКОВСКИЙ, канд. физ.-мат. наук, зав. отд.,

ИПМ НАН Украины, Киев;

О. В. ТАЛЬКО, м.н.с., ИПМ НАН Украины, Киев

АКУСТИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИОБИЯ

Для отработки технологии создания нового многокомпонентного жаропрочного сплава на основе ниобия по результатам акустического неразрушающего контроля проведено моделирование материала в соответствие трем задачам исследования: определение характеристик упругости, пористости и ликваций. По результатам моделирования проведена адаптация акустических методов контроля и оптимизация их параметров для эффективного решения каждой задачи. Адаптированные методы использованы для экспериментального определения указанных характеристик материала.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустические методы, сплав на основе ниобия, ликвации, поры, характеристики упругости.

Введение. При изготовлении опытной партии изделий из нового многокомпонентного жаропрочного сплава на основе ниобия как наиболее экономичный был выбран метод аргонодуговой плавки для получения материала. Необходимые размеры слитков достигались путем сплавления заготовок при неполном их расплавлении. В местах сплавления заготовок в слиток могут быть поры и непроплав. Кроме того, для многокомпонентных сплавов характерна ликвация по химическому составу. Возможность появления нестандартных дефектов требует использования нетрадиционных методов контроля их наличия.

Цель исследования. Контроль технологии получения материала с помощью неразрушающих акустических методов исследования

свойств и неоднородности структуры слитка для определения дальнейшей его пригодности при изготовлении изделий.

Постановка проблемы. Необходимо учитывать, что получение интегральных характеристик (в нашем случае упругости) неоднородного материала акустическими методами предполагает использование упругих волн длиной на порядок больших, чем неоднородности структуры, обнаружение отдельных дефектов – длин волн одного порядка с размерами возможных дефектов или менее, тогда как для обнаружения ликваций необходима оценка объёмной неоднородности изделия. Для эффективного выполнения каждой из этих задач необходима соответствующая адаптация к ней используемых методов контроля и оптимизация их параметров.

Объект исследования. В ИПМ НАН Украины разработан многокомпонентный жаростойкий сплав на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al. Для получения большого слитка использовался метод сплавления отдельных заготовок аргонодуговой плавкой. Исследование микроструктуры одного из первых неудачных образцов свидетельствует о наличии непроплава, образования пор литья и ликваций (рис. 1).

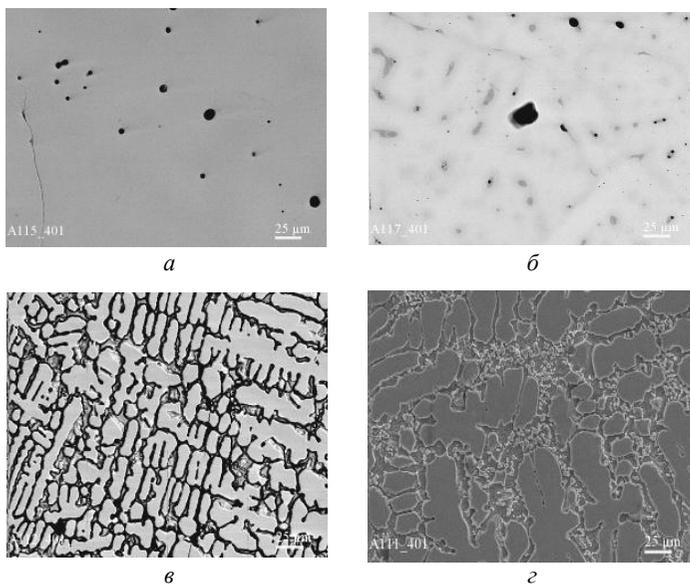


Рис. 1 – Микроструктура сплава на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al:
а, б – нетравленая поверхность;
в, г – травленые шлифы

Технология изготовления сплава была усовершенствована. Из нового слитка был вырезан образец для проведения исследований, который имел форму параллелепипеда (рис. 2). Результаты исследования свойств и дефектности этого образца с помощью ультразвука представлены ниже.

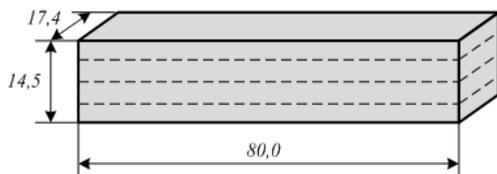


Рис. 2 – Исследуемый образец

В табл. 1 приведены характеристики компонентов материала. Учитывая процентное содержание каждого элемента, получили расчетные свойства смеси.

Таблица 1 – Характеристики компонентов сплава на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al

Элемент	Процентное содержание		Плотность, гр/см ³	СР УВ, м/с		Модули упругости, ГПа	
	Массовая доля	Объемная доля		C_l	C_t	E	G
Ниобий	48,94	36,57	8,55	4 920	2 100	110	37
Хром	12,17	10,56	7,19	6 850	3 980	294	115
Титан	11,21	15,98	4,54	4 900	2 830	112	41
Цирконий	21,36	20,83	6,51	4 900	2 357	97	36
Алюминий	6,32	16,06	2,70	6 260	3 080	70	26
Смесь			6,45	5 333	2 627	121	44

Моделирование эксперимента. Решение поставленной задачи производилось в несколько этапов. Для каждого этапа следует выделить характерные свойства образца, которые могут влиять на результаты измерений. Эти свойства заложены в моделях, показанных на рис. 3.

Модель 1 – Однородный изотропный материал. Для определения характеристик упругости нужно проверить является ли образец

изотропным и однородным (рис. 3, *a*). При этом необходимо выбрать такую частоту прозвучивания, чтобы длина волны была на порядок больше чем предполагаемые размеры дефектов.

Модель 2 – Материал с дефектами. Для обнаружения дефектов необходимо использовать упругие волны длиной одного порядка с размерами возможных дефектов или менее (рис. 3, *б*). Форму и размеры дефектов можно оценить по снимкам поперечного сечения (рис. 1).

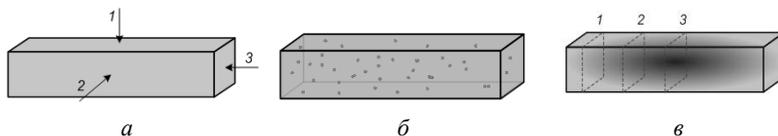


Рис. 3 – Модели материала: *a* – однородный изотропный; *б* – с дефектами; *в* – с ликвациями

Модель 3 – Материал с ликвациями. На рис. 3, *в* показана неоднородность по химическому составу. Пунктиром выделены три разные области, для которых сделаны снимки микроструктуры (рис. 1, *б*, *в*, *г*). Рис. 1, *б* получен при съемке нетравленной поверхности. Рельеф на поверхности образца, который виден на нем, образовался при приговлении шлифа и свидетельствует о неоднородности истирания в результате ликваций. Рис. 1, *в*, *г* получены на травленных шлифах. При одинаковом увеличении на них видно различие в размере дендритов и около дендритных зон, в которых имеет место ликвация.

Методика измерений. Прозвучивание образца проводили во всех направлениях (рис. 4), с возбуждением продольных, поперечных и стержневых упругих волн. Для этого применяли импульсный и резонансный метод.

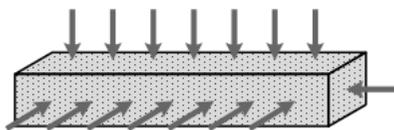


Рис. 4– Направления прозвучивания образца

При использовании радиоимпульса частотой 5 МГц в разных точках в одном направлении получили одинаковые значения скорости

распространения упругих волн (СР УВ). А при изменении направления прозвучивания значение изменилось незначительно (в пределах погрешности).

В импульсном методе СР УВ определяли по времени сквозного прохождения упругого импульса через исследуемый образец. Измерение времени прохождения проводили на частоте 5 МГц методом радиоимпульса с дискретной задержкой [1].

СР УВ (продольной или поперечной) определяли по формуле:

$$c = \frac{h}{t_{изм} - t_o}, \quad (1)$$

где $t_{изм}$ – измеряемое время; t_o – систематическая погрешность измерений.

В резонансном методе возбуждали в образце вынужденные ультразвуковые колебания и определяли первую резонансную частоту. По резонансной частоте f , рассчитывали СР УВ в стержне [2], по формуле:

$$c_{cm} = \frac{f}{2l}, \quad (2)$$

где l – длина стержня.

Оценка характеристик упругости. По результатам измерения СР УВ в разных точках имеем квазиизотропный и квазиоднородный материал. Таким образом, в рамках модели 1 (рис. 3, а) можно характеризовать материал двумя характеристиками упругости, например, модулем Юнга и модулем сдвига. Три наиболее широко используемые характеристики упругости определяют по известным [3] формулам:

$$E = \frac{c_t^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}; \quad G = c_t^2 \rho; \quad \nu = \frac{1 - 2(c_t / c_l)^2}{2(1 - (c_t / c_l)^2)}, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга, G – модуль сдвига; c_l, c_t – СР продольной и поперечной УВ, соответственно; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность.

В соответствие резонансному методу в заданном направлении связь модуля упругости материала со СР УВ определяется известной [4] формулой:

$$E = c_{cm}^2 \rho, \quad (4)$$

c_{cm} – СР УВ в стержне.

Сопоставляя эти два метода, следует отметить, что в изотропном теле резонансный метод позволяет определять только модуль Юнга по результатам измерения одной СР УВ, тогда как импульсный метод по измерению одной СР УВ позволяет определить только модуль сдвига, а для определения модуля Юнга необходимо измерение двух СР УВ.

При этом мы получаем полный набор характеристик упругости для изотропного тела.

Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты измерений упругих волн и характеристик упругости в образце сплава на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al

Скорость продольных волн, м/с	$5\,480 \pm 27$
Скорость поперечных волн, м/с	$2\,630 \pm 13$
Скорость в стержне, м/с	$4\,220 \pm 21$
Коэффициент Пуассона	0,35
Модуль Юнга (импульсный метод), ГПа	122 ± 1
Модуль Юнга (резонансный метод), ГПа	116 ± 1
Модуль Сдвига, ГПа	$45 \pm 0,5$

Погрешность определения СР УВ в исследуемых образцах для обоих методов не превышала 0,5 %, а модулей упругости – 1 %. Значения модулей упругости полученные импульсным методом практически не отличаются от расчетных (табл. 1). Модуль Юнга, полученный резонансным методом, имеет заниженное значение. Это можно объяснить тем, что форма образца отличается от классической стержневой.

Дефектоскопия. В рамках модели 2 (рис. 3, б) предполагается наличие дефектов разных размеров. Для их обнаружения перешли на максимально доступную частоту 10 МГц.

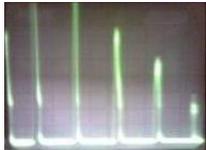
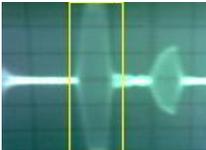
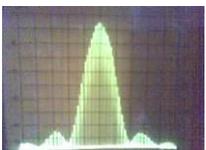
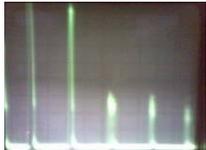
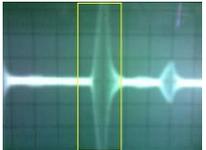
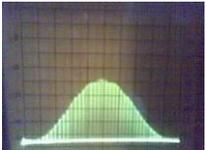
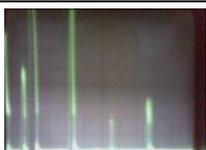
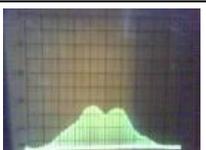
Прозвучивание образца проводили двумя методами: с помощью стандартного дефектоскопа и с использованием радиоимпульсного возбуждения по схеме, описанной в работе [5]. С помощью анализатора спектра получили характерные спектрограммы. В табл. 3 показаны выборочные сигналы для трех случаев:

1. При отсутствии дефектов происходит равномерное затухание донного сигнала. Спектр первого принятого сигнала (радиоимпульс в рамке) имеет правильную форму.

2. При скоплении мелких дефектов увеличивается затухание сигнала и изменяется форма спектра.

3. В случае, когда попадают дефекты более 0,2 мм, удается обнаружить сигнал, отраженный от дефекта. А на спектре появляется дополнительная составляющая.

Таблица 3 – Дефектоскопия образца сплава на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al

	Сигнал с выходадефектоскопа	Радиоимпульс 10 МГц	Спектр
1. Нет дефектов			
2. Дефекты меньше 0,2 мм			
3. Дефекты больше 0,2 мм			

Ликвации. В соответствии с третьей моделью (рис. 3, в) в образце могут образоваться неоднородности по химическому составу. Обнаружить их с помощью дефектоскопа невозможно, так как они не имеют четких границ. Измерения СР УВ в разных областях также не дали результата: во всех случаях при разных частотах получили одинаковые значения. Это можно объяснить тем, что все компоненты материала имеют близкие акустические свойства (табл. 1).

Выводы.

1. Разработаны и экспериментально проверены три акустические модели нового многокомпонентного жаропрочного сплава на основе ниобия, отражающие его свойства, актуальные для отработки технологии создания материала (характеристик упругости, пористости и ликваций), и позволяющие адаптировать неразрушающие акустические методы контроля для эффективного исследования этих свойств.

2. Показано, что материал исследуемой плавки в макроскопическом рассмотрении можно считать квазиизотропным и квазиоднородным, поэтому состояние его упругости полностью описывается двумя характеристиками упругости, например модулями Юнга и сдвига, полученными по результатам измерений двух скоростей распространения упругих волн: продольной и поперечной или волны в стержне. Эти скорости могут быть измерены импульсным или импульсным и резонансным методами на частотах не более 5 МГц.

3. На частотах 10 МГц при эхо-импульсном прозвучивании исследуемого образца во всех направлениях с использованием ударного или радиоимпульсного возбуждения были обнаружены скопления неоднородностей размером менее 0,2 мм и одиночные дефекты размером 0,2..0,5 мм, которые давали характерные осциллограммы и спектрограммы.

4. Ликвации в исследуемом образце не выявлены, что можно объяснить близкими значениями акустических свойств материала или маскировкой ликваций пористостью. Поэтому дальнейшее развитие исследований может быть связано с усовершенствованием измерительной модели эксперимента для обеспечения более эффективного выявления ликваций.

Список литературы: 1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 302 с. 2. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав.ред. И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с. 3. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория упругости. – М., 1965. 4. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник – К.: Наукова думка, 1982. – 285 с. 5. Безимьянный Ю. Г., Єпіфанцева Т. О., Козирацький Є. О. Дослідження впливу структури композита на основі мідного порошку із вольфрамовими вкрапленнями на швидкість поширення пружної хвилі. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб.наук.праць. Тематичний випуск "Електроенергетика і преобразовательная техника". – Харків: НТУ "ХПІ" – № 12. – 2010. С. 148-155.

Bibliography (transliterated): 1. Trujell R., Jel'baum Ch., Chik B. *Ul'trazvukovyemetody fiziketverdogotela*. Moscow.: Mir, 1972. 2. *Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija*. Ed. Goljamina. I. P. Moscow.: Sovetskaja jenciklopedija, 1979. 3. Landau L. D., Livshic E. M. *Teorijauprugosti*. Moscow., 1965. 4. Francevich I. N., Voronov F. F., Bakuta S. A. *Uprugie postojamyje i moduli uprugosti metallov i nemetallov. Spravochnik*. Kiev.: Naukova dumka, 1982. 5. Bezimjannyi Y. G., Yepifanceva T. O., Kozyracz'kyj E. O. *Doslidzhennyavply' vustruktury` kompozy` tanaosnovimidnogoporoshkuizvol` framovy`my` vkraplennyamy` nashvy`dkist` poshy`rennyapruzhnoyixvy`li*. // Kharkiv: NTU "KhPI" – 2010. 148-155. Print.

Поступила (received) 02.06.2015