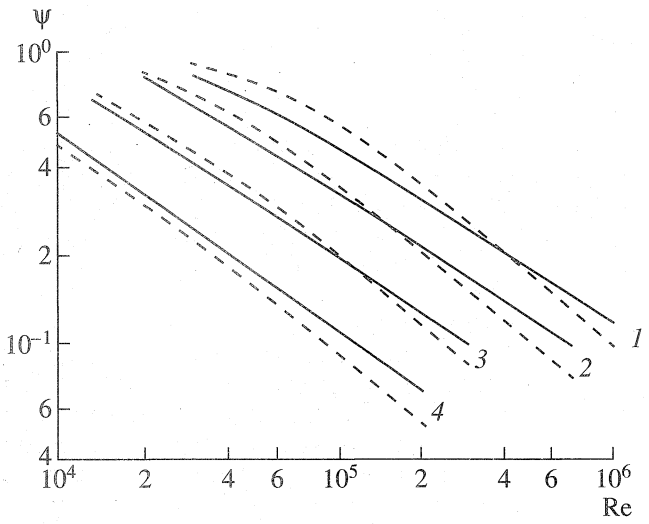
В. В. Рощупкин, М. А. Покрасин, А. И. Чернов, Н. А. Семашко, С. Ф. Филоненко, Экспериментальное исследование температурной зависимости скорости звука в конструкционных материалах для атомной энергетики,
ТВТ, 1999, том 37, выпуск 5, 835–838

https://www.mathnet.ru/tvt2378



Относительный закон трения при течении максвелловской жидкости в трубе. Сплошные линии – численный расчет [3], штриховые линии – расчет по соотношению (5): *1* – $T = 8 \times 10^{-7}$, *2* – $T = 2.4 \times 10^{-6}$, *3* – $T = 8 \times 10^{-6}$, *4* – $T = 4 \times 10^{-5}$.

Естественно предположить, что для случая течения неньютоновской (максвелловской) жидкости время торможения будет больше "эталонного" на величину времени релаксации вязких напряжений t_r [3]. Отсюда в соответствии с (1) получаем коэффициент трения

$$\xi \simeq \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{U} \sqrt{\frac{\nu}{t_0 + t_r}}. \qquad (4)$$

Тогда из (1)–(4) определим следующий относительный закон трения:

$$\psi = \frac{\xi}{\xi_*} = (1 + 2.5 \times 10^{-2} \mathrm{Re}^{8/5} T)^{-1/2}, \qquad (5)$$

где $\mathrm{Re} = DU/\nu$ – число Рейнольдса; $T = \nu t_r / D^2$ – "параметр релаксации"; D – диаметр трубы.

Как видно из рисунка, расчет по соотношению (5) без введения какой-либо "подгоночной константы" достаточно хорошо воспроизводит результаты численного анализа [3]. Отметим, что в рамках представленной простой модели течения эффект снижения трения при увеличении времени релаксации вязких напряжений объясняется увеличением времени торможения у стенки согласно (4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мотулевич В.П.* Метод относительного соответствия и его применение в задачах тепло- и массообмена // ИФЖ. 1968. Т. 14. № 1. С. 8.
2. *Гудков В.И., Мотулевич В.П.* Применение метода относительного соответствия в задачах тепломассообмена и горения. Тепломассообмен при химических превращениях. Тр. 2-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 184.
3. *Городцов В.А., Леонов А.И.* О снижении сопротивления турбулентного трения в упруговязких жидкостях. Турбулентные течения. М.: Наука, 1974. С. 111.
4. *Репик Е.У., Соседко Ю.П.* Модели турбулентного пограничного слоя, основанные на использовании квазиупорядоченной структуры пристенной турбулентности. Механика неоднородных сред. Новосибирск: Изд-во ИТФ СО РАН, 1981. С. 82.

УДК 534.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ЗВУКА В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 1999 г. В. В. Рощупкин, М. А. Покрасин, А. И. Чернов, Н. А. Семашко, С. Ф. Филоненко

Институт металлургии им. А.А. Байкова РАН, Москва

Поступило в редакцию 19.01.99 г.

Широкое использование сплавов циркония в качестве конструкционных материалов предъявляет повышенные требования к всестороннему и глубокому изучению их физических свойств.

Наибольший интерес для отечественного реакторостроения представляют сплавы циркония, содержащие 1 и 2.5 мас. % ниобия. Ранее [1] нами были исследованы теплоемкость и электросопротивление сплава Zr–2.5 мас. % Nb в широком диапазоне температур с высокой точностью, позволившей выявить аномалии этих свойств в области $(\alpha + \beta_{Nb}) \longrightarrow (\alpha + \beta_{Zr})$ и $(\alpha + \beta_{Zr}) \longrightarrow \beta_{Zr}$ фазовых переходов. В данной статье речь пойдет об определении скорости звука в том же сплаве с целью продолжения исследования фазовых переходов. Отметим, что данные по скорости звука ши-

Таблица 1

№ сплава	Содержание элементов, мас. %						
	Nb	Si	N	C	Al	O	H
1	2.46	0.006	0.001	0.005	0.005	0.031	0.005
2	2.48	0.009	0.005	0.010	0.005	0.013	0.002

Таблица 2

Ni	Mo	Ti	Cr	Fe
основа	12%	0.5%	7%	следы

роко используются для весьма точных расчетов модулей упругости твердых тел, в том числе модулей упругости третьего порядка [2].

Проведены также исследования скорости звука в сплаве Хастеллой-Н и стали Х2.5М, которые используются в энергетическом машиностроении взамен более дорогой хромоникелевой аустенитной стали.

К моменту постановки представленной работы данные о температурной зависимости акустических свойств упомянутых сплавов в литературе отсутствовали.

Для экспериментального исследования акустических свойств (скорости звука и коэффициента затухания), а также для исследования динамики фазовых переходов I и II рода была разработана и создана автоматизированная установка, реализующая один из вариантов импульсного метода [3]. Установка позволяет получить прецизионные данные об акустических свойствах твердых тел в широком диапазоне температур. Высокая точность измерений достигается благодаря сохранению в процессе измерений высокочастотной составляющей импульса. Это дает возможность в несколько раз повысить точность измерения временных интервалов и амплитуд колебаний. Обычно в импульсных методах сигнал детектируется, в результате чего возникает неопределенность в форме огибающей импульса в процессе его перемещения вдоль образца и многократных отражений. Повышению надежности и точности способствуют также обеспечение изотермичности рабочего участка образца, исключение интерференционных эффектов, упрощенный способ возбуждения ультразвуковых волн, анализ и обработка измеряемых параметров с помощью ЭВМ нового поколения. Последнее обеспечивает высокую скорость ввода и анализа информации, автоматическое слежение за изменением параметров, неоднократную повторную обработку и хранение их в памяти компьютера.

В комплект разработанного нами программно-технического комплекса для исследования акустических параметров металлов и сплавов входит генератор ультразвуковых сигналов, устройство измерения, стыкующая плата и персональный компьютер. Генератор ультразвуковых сигналов позволяет проводить регулировку параметров сигналов, в частности, дискретно изменять амплитуду, длительность, период и их частоту. Может осуществляться также плавная регулировка частоты. В процессе измерения предусмотрена как автоматическая, так и ручная синхронизация сигналов. Программное обеспечение комплекса позволяет задавать температурный диапазон измерений, а также температурный шаг последних. В системе есть возможность как автоматического измерения скорости звука в заданном режиме, так и измерений в любой момент времени в ручном режиме, а также возможность проведения калибровки датчиков температуры и изменения коэффициентов калибровочного уравнения. Калибровочная зависимость температурных датчиков описывается полиномом шестой степени, что обеспечивает хорошую интерполяцию в широком диапазоне температур для термопар типа ТХА и ПП1. Температура, параметры импульсов, значения скорости звука и коэффициента затухания измеряются в реальном масштабе времени с выводом результатов на экран монитора. Программное обеспечение позволяет получать экспериментальные данные как в графическом, так и в табличном виде с сохранением полученных результатов в памяти компьютера и использованием результатов для дальнейшего анализа. В предлагаемой статье представлены результаты, полученные в ручном режиме проведения измерений.

В работе проводилось исследование температурной зависимости скорости звука в двух образцах сплава Zr–2.5 мас. % Nb разного способа производства. Сплав 1 изготавливался из циркония иодидного способа производства; сплав 2 состоял из 50% циркония электролитического способа производства, 30% иодидного и 20% оборотов производства. Химический состав исследованных материалов представлен в табл. 1.

В табл. 2 приведен химический состав сплава Хестеллой-Н в мас. %.

Исследования проводились на проволочных образцах диаметром 2 мм и длиной 400 мм. На расстоянии 60 мм от торца образца делалась проточка диаметром 1.2 мм. Таким образом, сам образец служил звукопроводом для вывода места крепления пьезодатчика из зоны нагрева. Крепление датчика производилось непосредственно на образце через засверленное в датчике отверстие с помощью легкоплавкой акустопроводящей среды. Образцы изготавливались из металлических заготовок в виде цилиндров протяжкой через фильтры до нужного диаметра с последующим их отжигом в вакууме при температуре 900°С для снятия напряжений. Нагрев образцов осуществлялся в цилиндрической нагревательной печи в вакууме. Высота печи составляла 500 мм, что позволяло получить в центральной части практически рав-

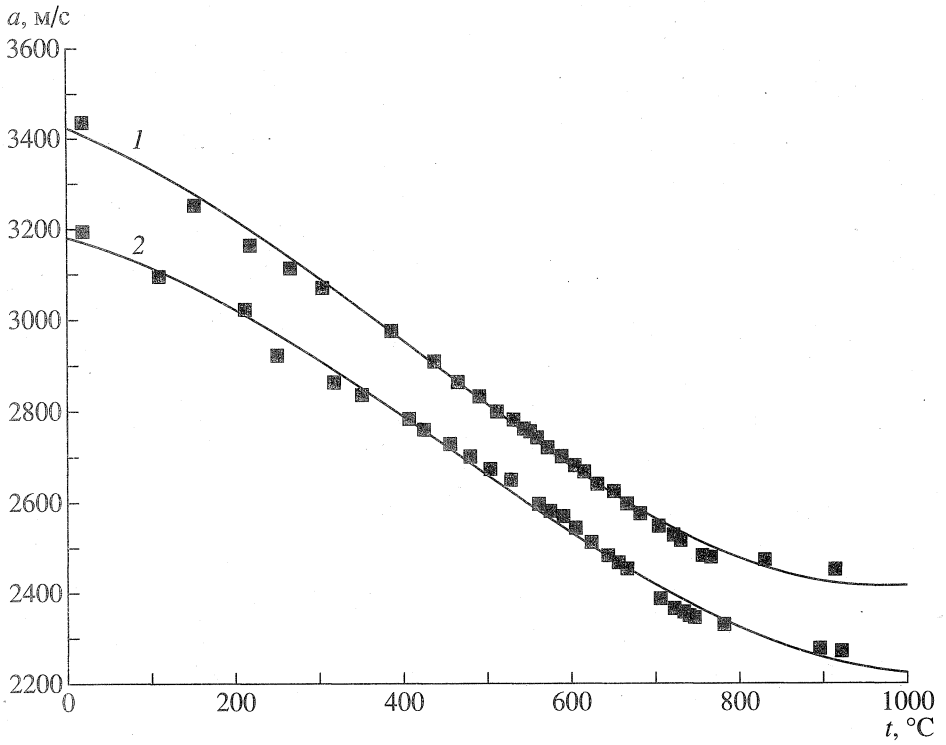


Рис. 1. Температурная зависимость скорости звука в сплаве Zr–2.5 мас. % Nb: *1* – сплав 1, *2* – сплав 2.

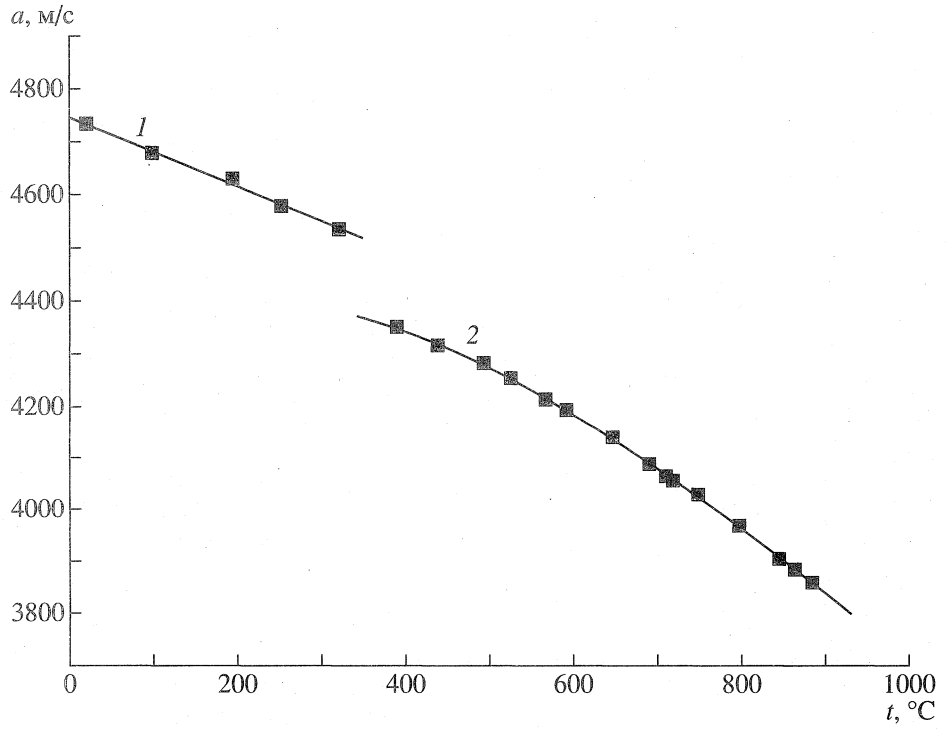


Рис. 2. Температурная зависимость скорости звука в сплаве Хастеллой-Н: *1* – участок 1, *2* – участок 2.

номерную температурную область. Скорость звука определялась путем измерения времени прохождения импульсом ультразвука рабочего участка образца между его торцом и проточкой, расстояние между которыми измерялось с помощью катетометра. Результаты исследования скорости звука представлены в табл. 3 и на рис. 1 (сплав 1, сплав 2), и рис. 2 (Хастеллой-Н).

Таблица 3

Сплав 1				Сплав 2			
t, °C	a, м/с	t, °C	a, м/с	t, °C	a, м/с	t, °C	a, м/с
21	3433	589	2698	18	3189	607	2541
152	3251	604	2676	110	3089	626	2508
219	3163	616	2662	212	3017	644	2477
267	3111	633	2635	251	2918	656	2464
306	3068	652	2620	317	2857	666	2448
388	2972	667	2592	351	2831	706	2382
437	2904	682	2572	407	2779	724	2362
466	2863	705	2544	426	2755	734	2355
492	2830	723	2522	457	2723	742	2347
512	2796	731	2511	480	2692	748	2341
532	2777	755	2478	505	2667	782	2324
545	2758	768	2475	527	2645	897	2276
552	2750	830	2470	562	2594	923	2265
560	2737	916	2446	575	2578		
572	2716			591	2564		
Х2.5 М				Хастеллой-Н			
20	4862	520	4502	20	4732	647	4137
108	4804	541	4465	98	4677	692	4086
153	4781	591	4414	195	4628	710	4061
209	4734	625	4353	254	4575	720	4053
224	4760	657	4304	322	4533	749	4024
264	4738	697	4236	390	4350	797	3964
307	4697	732	4149	438	4312	846	3902
356	4646	742	4224	494	4280	864	3883
386	4612	768	4053	525	4252	883	3856
450	4560	846	3834	569	4212		
479	4538			593	4189		

Проведенная методом наименьших квадратов математическая обработка полученных экспериментальных результатов позволила получить следующие аппроксимирующие уравнения:

сплав 1: $a = 3423.64 - 0.7692t - 0.0016t^2 + 1.3773 \times \times 10^{-6}t^3$, $\delta = 0.7\%$,

сплав 2: $a = 3174.99 - 0.4753t - 0.0018t^2 + 1.3111 \times \times 10^{-6}t^3$, $\delta = 0.95\%$,

Х2.5М: $a = 4884.61 - 0.8949t + 0.0014t^2 - 2.1515 \times \times 10^{-6}t^3$, $\delta = 0.33\%$,

Хастеллой-Н

участок 1: $a = 4732.02 - 0.6132t$, $\delta = 0.15\%$,

участок 2: $a = 4386.18 + 0.4582t - 0.0016t^2 + + 4.7566 \times 10^{-7}t^3$, $\delta = 0.08\%$,

где a – скорость звука в м/с; t – температура в °С; δ – среднее квадратическое отклонение опытных точек от сглаживающего уравнения.

Как видно из рис. 1, в сплавах *1* и *2* наблюдается аномалия в поведении скорости звука вблизи 800°С, которая связана с $(\alpha + \beta_{Zr}) \longrightarrow \beta_{Zr}$ фазовым переходом, что подтверждается и нашими данными по теплоемкости и электросопротивлению. Разница в абсолютных значениях скорости звука обусловлена различным химическим составом образцов, изготовленных разными способами. Аномалия наблюдается и для сплава Хастеллой-Н в области 350°С в окрестности фазового перехода из ферромагнитного в парамагнитное состояние в никеле.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 98-02-16696).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рощупкин В.В., Покрасин М.А., Чернов А.И., Семашко Н.А.* Теплоемкость и электросопротивление сплава циркония с 2.5 мас. % ниобия в области фазовых переходов // ТВТ. 1996. Т. 34. № 6. С. 980.

2. *Мак-Скимин Г.* Физическая акустика. Т. 1А. М.: Мир, 1966.

3. *Покрасин М.А., Семашко Н.А., Рощупкин В.В., Чернов А.И.* Способ определения скорости звука. А.с. № 121611 // БИ. 1986. № 6.