

## Исследование акустических свойств жаропрочного сплава на никелевой основе

В. В. Рощупкин, М. М. Ляховицкий, М. А. Покрасин,  
Н. А. Минина, **А. И. Чернов**

Приведены результаты экспериментального исследования акустических свойств (скорость и коэффициент затухания ультразвука) и относительного температурного расширения сплава ВЖЛ14 в температурном диапазоне 20 – 1100 °С. Использование в работе дилатометрического метода позволяет в значительной степени не только повысить точность экспериментальных данных об акустических свойствах, но и рассчитать температурную зависимость плотности сплава. Данные об акустических и дилатометрических свойствах позволяют рассчитать температурную зависимость модуля Юнга, получить которую при механических испытаниях достаточно сложно. Для уточнения границ фазовых превращений в материалах был использован акустико-эмиссионный программно-технический комплекс. Рассчитаны аппроксимирующие уравнения для температурных зависимостей исследованных и рассчитанных на их основе теплофизических и механических свойств сплава.

**Ключевые слова:** сплав, скорость ультразвука, коэффициент затухания, тепловое расширение, модуль Юнга.

### Введение

Увеличение параметров и ресурса работы современных газотурбинных двигателей в основном достигнуто за счет использования жаропрочных сплавов, которые используют при длительном воздействии нагрузок, высоких температурах и агрессивных средах.

Сплав ВЖЛ14 исследованный в работе используется в основном при изготовлении лопаток газотурбинных двигателей.

Экспериментальные данные об акустических свойствах и полученные дополнительно результаты дилатометрических исследований позволяют легко рассчитать значения плотности и модуля Юнга и построить их температурные зависимости.

Цель работы — исследование акустических свойств жаропрочного сплава ВЖЛ14.

### Методика измерений акустических свойств.

В табл. 1 приведен химический состав сплава ВЖЛ14 по данным [1].

Исследование температурных зависимостей акустических свойств сплава проводилось на коротких стержневых образцах по методике [2], модернизированной авторами [3].

Особенности методики измерений достаточно полно представлены в [4]. Основное требование к исследуемым образцам состоит в качестве их изготовления для того, чтобы свести к минимуму посторонние шумы и искажения эхо-сигнала [5]. Коэффициент отражения ультразвука от акустической метки является безразмерной величиной и не зависит от температуры [5], что позволяет использовать при проведении акустических измерений другие конфигурации рабочего участка образца [6].

Таблица 1

Химический состав сплава ВЖЛ14 по данным [1], масс. %

Ni	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	Ti	Fe	B
основа	≤ 0,08	≤ 0,4	≤ 0,4	18 – 20	4 – 5	1,2 – 1,5	2,5 – 3,1	8 – 10	≤ 0,05

Необходимость использования различных конфигураций измерительного участка образца связана как с технологическими трудностями при изготовлении длинномерных стержневых образцов, так и при исследовании материалов с высокими значениями коэффициента затухания. Для учета температурного расширения при расчете значений скорости и коэффициента затухания ультразвука были проведены дополнительные исследования относительного температурного расширения на высокоскоростном термическом dilatометре DL-1500-RH. Полученные экспериментальные данные позволяют достаточно просто рассчитать значения температурного коэффициента линейного расширения [7]. Однако в формулы для расчета для скорости и коэффициента затухания ультразвука вводили данные об относительном температурном расширении, так как расчет по значениям температурного коэффициента линейного расширения вносил дополнительную погрешность в акустические свойства. Данные об относительном температурном расширении позволили не только уточнить значения скорости и коэффициента затухания ультразвука, но и построить температурную зависимость плотности исследованного сплава. Плотность исследованного материала при комнатной температуре определяли с высокой точностью методом гидростатического взвешивания. Полученные экспериментальные данные о скорости звука и плотности позволяют рассчитать модуль Юнга по известному соотношению

$$E = \rho c^2,$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\rho$  — плотность,  $c$  — скорость звука [8], а данные о коэффициенте затухания ультразвука — в первом приближении рассчитать коэффициент внутреннего трения  $\delta$  в исследованном материале по формуле

$$\delta = \frac{a\lambda}{\pi},$$

где  $a$  — коэффициент затухания,  $\lambda$  — длина волны [9].

Погрешность измерения скорости ультразвука составляет 0,2 %, коэффициента затухания — 3 %, относительного температурного расширения образца — 0,1 %.

Полученные экспериментальные и расчетные на их основе данные о свойствах сплава ВЖЛ14 обрабатывали методом наименьших квадратов для получения их температурных зависимостей в виде

$$Y = A + Bt + Ct^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $Y$  — свойство,  $t$  — температура, °С.

## Результаты измерений и их анализ

Экспериментально исследованы акустические параметры (скорость и коэффициент затухания ультразвука) и относительное температурное расширение сплава ВЖЛ14 в диапазоне температур от комнатной до 1100 °С. На рис. 1 представлены результаты экспериментального исследования акустических, акустико-эмиссионных свойств и относительного температурного расширения исходного и отожженного при 1100 °С в течение 2 ч образцов сплава.

Как видно из рис. 1, скорость ультразвука ( $a$ ) и относительное температурное расширение ( $b$ ) исходного и отожженного образцов практически совпадают. Иная картина наблюдается для коэффициента затухания ультразвука ( $b$ ). Так в диапазоне 930 – 1000 °С в поведении указанного свойства обнаружена явно выраженная аномалия. Из рис. 1б видно, что отжиг образца происходит приблизительно при 1020 °С, а в области аномалии, можно предположить, происходит фазовое превращение. В составе сплава присутствует большое количество железа, а при температуре около 917 °С в железе

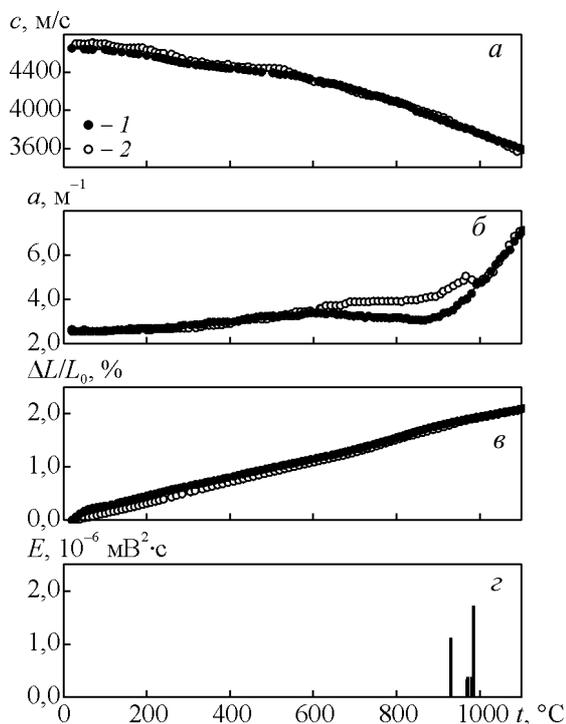


Рис. 1. Температурные зависимости:  $a$  — скорости ультразвука,  $b$  — коэффициента затухания ультразвука,  $c$  — относительного температурного расширения (1 — исходное и 2 — отожженное состояние),  $d$  — энергии акустико-эмиссионных сигналов, в сплаве ВЖЛ14.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения свойств сплава ВЖЛ14

Температура, °С	Скорость звука $c$ , м/с	Коэффициент затухания, $a$ , м <sup>-1</sup>	Относительное температурное расширение, $\Delta L/L_0$ , %	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, $E$ , ГПа
20	4653,1	2,65	0	8065,0	174,6
50	4644,6	2,64	0,04	8054,6	173,8
100	4639,5	2,61	0,13	8030,7	172,9
150	4607,5	2,65	0,22	8009,2	170,0
200	4578,2	2,63	0,31	7986,3	167,4
250	4533,9	2,67	0,41	7963,0	163,7
300	4489,7	2,70	0,52	7937,2	160,0
350	4464,1	2,84	0,62	7913,8	157,7
400	4440,3	2,91	0,72	7890,9	155,6
450	4449,6	2,84	0,81	7871,0	155,8
500	4442,3	3,19	0,90	7848,7	154,9
550	4393,7	3,35	1,00	7827,7	151,1
600	4305,2	3,52	1,09	7806,4	144,7
650	4282,0	3,73	1,18	7786,4	142,8
700	4197,9	3,90	1,28	7764,7	136,8
750	4152,2	3,92	1,39	7738,9	133,4
800	4084,0	3,92	1,51	7710,4	128,6
812	4068,0	3,90	1,54	7705,4	127,5
824	4055,0	3,98	1,57	7699,0	126,6
836	4035,4	3,98	1,60	7694,3	125,3
848	4012,9	3,98	1,61	7679,0	123,7
860	3996,9	4,03	1,64	7683,1	122,7
870	3982,4	4,09	1,67	7678,5	121,8
883	3965,8	4,13	1,69	7673,1	120,7
894	3951,3	4,13	1,71	7678,1	119,9
906	3936,7	4,25	1,74	7663,6	118,8
925*	3897,6	4,47	1,78	7653,2	116,3
935*	3872,2	4,61	1,80	7648,7	114,7
948*	3844,6	4,75	1,84	7641,2	112,8
960*	3822,1	4,85	1,86	7635,6	111,5
966*	3813,4	5,06	1,87	7633,7	111,0
980*	3798,9	4,89	1,89	7629,7	110,1
994*	3764,8	4,78	1,92	7622,9	108,0
1008	3747,4	4,92	1,94	7619,4	107,0
1045	3672,0	5,68	2,00	7606,9	102,6
1070	3615,4	6,46	2,03	7598,9	99,3
1100	3540,7	7,11	2,08	7589,1	95,1

\* данные, не включенные в математическую обработку

Таблица 3

Значения коэффициентов аппроксимирующего уравнения (1) для сплава ВЖЛ14

Свойство	$A$	$B$	$C$	$D$
Скорость звука, $c$ , м/с	4616,8	-0,041	$-8,1 \cdot 10^{-4}$	—
Коэффициент затухания ультразвука, $a$ , м <sup>-1</sup>	2,208	0,004	$-8,025 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$
Относительное температурное расширение, $\Delta L/L_0$ , %	-0,080	0,002	—	—
Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	8075,5	-0,45	—	—
Модуль Юнга, $E$ , ГПа	178,8	-0,034	$-3,6 \cdot 10^{-5}$	—

происходит  $\alpha \rightarrow \gamma$  переход [7]. С целью уточнения температурных границ выявленной аномалии были проведены дополнительные акустико-эмиссионные исследования, результаты которых представлены на рис. 1г. Полученные результаты подтвердили наличие аномалии в диапазоне температур 930 – 990 °С.

Следует заметить, что акустико-эмиссионный метод для уточнения температурных границ фазовых переходов был успешно использован авторами, в частности, при исследовании акустических свойств циркония [4] и ферритно-мартенситных хромистых сталей [10].

В табл. 2 приведены экспериментальные значения скорости, коэффициента затухания ультразвука и относительного температурного расширения, а также рассчитанные на их основе значения плотности и модуля Юнга стали в исследованном диапазоне температур. Математическая обработка методом наименьших квадратов экспериментальных и рассчитанных на их основе данных позволила получить аппроксимирующие уравнения в выше уравнения (1), коэффициенты которых приведены в табл. 3. В обработку не включали экспериментальные данные в области обнаруженной аномалии.

### **Выводы**

Проведено экспериментальное исследование акустических свойств сплава ВЖЛ14 в диапазоне температур от комнатной до 1100 °С и определены границы отжига исследованного сплава.

Установлены температурные границы области аномального поведения коэффициента затухания, связанной с происходящими в сплаве фазовыми превращениями.

Получены аппроксимирующие уравнения для температурных зависимостей скорости, коэффициента затухания ультразвука, относительного температурного расширения и рассчитанных на их основе значений плотности и модуля Юнга.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 14-08-00073а, 15-08-00645а).*

### **Литература**

1. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях. М.: ВИАМ, 1996, 21 с.
2. Gobran N.K., Youssef H. New Method for the measurement of ultrasonic attenuation in solids at high temperatures. The Journal of the Acoustical Society of America, 1966, v. 39, no. 6, p. 1120 – 1124.
3. Покрасин М.А., Рошупкин В.В., Семашко Н.А., Чернов А.И. Способ определения скорости звука. Авторское свидетельство № 1211611. Бюллетень изобретений, 1986, № 6, с. 188.
4. Новиков И.И., Рошупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Минина Н.А., Чернов А.И., Соболев Н.Л., Кольцов А.Г., Клименко С.А. Исследование акустических свойств циркония. Перспективные материалы, 2013, № 11, с. 75 – 79.
5. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. М.: Издво стандартов, 1970, 238 с.
6. Новиков И.И., Рошупкин В.В., Покрасин М.А., Ляховицкий М.М., Чернов А.И., Пенкин А.Г.,

Соболев Н.Л., Кольцов А.Г. Акустический и акустико-эмиссионный методы исследования физико-механических свойств конструкционных сталей. Приборы, 2012, № 3, с. 51 – 57.

7. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974, 294 с.
8. Физическая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, Ред. А.М. Прохоров, 1994, т. 4, 706 с.
9. Семашко Н.А., Лановенко Е.В., Лановенко В.В., Казберов Д.С. Исследование акустических свойств ферромагнитных металлов и сплавов. Материаловедение, 2000, № 11, с. 13 – 20.
10. Новиков И.И., Рошупкин В.В., Кольцов А.Г., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Минина Н.А., Чернов А.И., Соболев Н.Л., Севостьянов М.А. Акустические и акустико-эмиссионные свойства ферритно-мартенситных хромистых сталей. Физика и химия обработки материалов. 2012, № 2, с. 87 – 91.

### **References**

1. Sorokin L.I. Svarivaemost zsaroprochnykh splyavov, primenayemykh v aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelyakh [Weldability of high-temperature alloys used in aircraft gas turbine engines]. Moscow, VIAM Publ., 1996, 21 p.
2. Gobran N.K. and Youssef H. New method for the measurement of ultrasonic attenuation in solids at high temperatures. The Journal of the Acoustical Society of America. 1966, vol. 39, no. 6, pp. 1120 – 1124.
3. Pokrasin M.A., Roshchupkin V.V., Semashko N.A., Chernov A.I. Sposob opredeleniya skorosti zvuka [Method of sound speed determination]. Certificate RF of authorship no. 1211611. Byulleten izobreteny — Invention bulletin. 1986, no. 6, p. 188.
4. Novikov I.I., Roshchupkin V.V., Lyakhovitskii M.M., Pokrasin M.A., Minina N.A., Chernov A.I., Sobol' N.L., Kol'tsov A.G., Klimenko S.An. Issledovaniye akusticheskikh svoystv tsirkoniya [Study of zirconium acoustic properties]. Perspektivnye materialy — Advanced materials (in Rus). 2013, no. 11, pp. 75 – 79.
5. Kolesnikov A.E. Ul'trazvukovye izmereniya [Ultrasonic measurements]. Moscow, Standarty Publ., 1970, 238 p.
6. Novikov I.I., Roshchupkin V.V., Pokrasin M.A., Lyakhovitskii M.M., Chernov A.I., Penkin A.G., Sobol' N.L., Kol'tsov A.G. Akustichesky i akustiko-emissionny metody issledovaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv konstruksionnykh staley [Acoustic and acoustic-emission methods of investigation of physical and mechanical properties of structural steels]. Pribory — Measurement instruments (in Rus). 2012, no. 3, pp. 51 – 57.
7. Novikova S.I. Teplovoe rasshireniye tverdykh tel [Thermal expansion of solid bodies]. Moscow, Sciences Publ. 1974, 294 p.
8. Prokhorov A.M. Fizicheskay entsiklopediy [Physical encyclopedia]. Moscow, Big Russian encyclopedia Publ. 1994, vol. 4. 706 p.

9. Semashko N.A., Lanovenko E.V., Lanovenko V.V., Kazberov D.S. Issledovanie akusticheskikh svoystv ferromagnitnykh metallov i splavov [Research of acoustic properties of ferromagnetic metals and alloys]. *Materialovedenie — Materials Science (in Rus)*, 2000, no. 11, pp. 13 – 20.
10. Novikov I.I., Roshchupkin V.V., Kol'tsov A.G., Lyakhovitskii M.M., Pokrasin M.A., Minina N.A., Chernov A.I., Sobol N.L., Sevostyanov M.A. Akusticheskiye i akustiko-emissionnyye svoystva ferritno-martensitnykh khromistykh staley [Acoustic and acoustic-emission properties of ferritic-martensitic chromium steels]. *Fizika i himiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment (in Rus)*, 2012, no.2, pp. 87 – 91.

*Статья поступила в редакцию 7.04.2015 г.*

**Рощупкин Владимир Владимирович** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991 Москва, Ленинский пр. 49), заведующий лабораторией, доктор технических наук, профессор, специалист в области теплофизики, материаловедения и молекулярной акустики. E-mail: vvro@mail.ru

**Ляховицкий Марк Матвеевич** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991 Москва, Ленинский пр. 49), старший научный сотрудник, кандидат технических наук, специалист в области теплофизики, материаловедения и молекулярной акустики. E-mail: mark.oldmark@gmail.com.

**Покрасин Михаил Александрович** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991 Москва, Ленинский пр. 49), ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, специалист в области теплофизики, материаловедения и молекулярной акустики. E-mail: pokrasin@gmail.com.

**Минина Наталья Анатольевна** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991 Москва, Ленинский пр. 49), старший научный сотрудник, специалист в области теплофизики и материаловедения. E-mail: minina@imet.ac.ru.

**Чернов Алексей Иванович** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, старший научный сотрудник. Скончался в 2015 году.

## **Investigation of the acoustic properties of heat-resistant alloy based on nickel**

**V. V. Roshchupkin, M. M. Lyakhovitskii, M. A. Pokrasin, N. A. Minina, A. I. Chernov**

The results of an experimental study acoustic (speed and attenuation factor of ultrasound) and relative temperature expansion of alloy VZhL14 are given in a temperature range 20 – 1100 °C. Using dilatometric method in the work, would greatly not only improve the accuracy of the experimental data on the acoustic properties, but also to calculate the temperature dependence of the alloys density. The experimental data on the acoustic and dilatometric properties make possible to calculate the temperature dependence of Young's modulus, which to get in mechanical tests is difficult. Acoustic emission software and hardware was used to clarify the boundaries of phase transformations in alloy. The approximating equations for temperature dependences of investigated and calculated thermophysical and mechanical properties of alloy were received.

**Key words:** alloy, speed of ultrasound, attenuation factor, thermal expansion, Young's modulus.

**Roshchupkin Vladimir** — A.A.Baikov institute of metallurgy and material science of RAS (Russia, 119991 Moscow, Leninskii pr. 49), DrSci (Eng), head of laboratory, professor, specialist in heat-physics, materials science and molecular acoustic. E-mail: vvro@mail.ru.

**Lyakhovitsky Mark** — A.A.Baikov institute of metallurgy and material science of RAS (Russia, 119991 Moscow, Leninskii pr. 49), PhD (Eng), senior researcher, specialist in heat-physics, materials science and molecular acoustic. E-mail: mark.oldmark@gmail.com.

**Pokrasin Mikhail** — A.A.Baikov institute of metallurgy and material science of RAS (Russia, 119991 Moscow, Leninskii pr. 49), PhD (PhysMath), leading researcher, specialist in heat-physics, materials science and molecular acoustic. E-mail: pokrasin@gmail.com.

**Minina Natalya** — A.A.Baikov institute of metallurgy and material science of RAS (Russia, 119991 Moscow, Leninskii pr. 49), senior researcher, specialist in heat-physics, materials science. E-mail: minina@imet.ac.ru.

**Chernov Aleksey** — A.A.Baikov institute of metallurgy and material science of RAS, senior researcher, specialist in heat-physics, materials science and molecular acoustic. Died in 2015.