

PACS numbers: 43.35.Zc, 61.72.Ff, 61.72.Hh, 62.20.fq, 62.40.+i, 81.40.Lm, 81.70.Cv

Акустические свойства новых сплавов Inconel 52 и Inconel 52MSS в интервале температур 77–1200 К

Ю. А. Семеренко, А. В. Мозговой*, Л. В. Скибина, К. А. Ющенко**,
А. В. Звягинцева**

*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина
НАН Украины,
пр. Ленина, 47,
61103 Харьков, Украина*

**Винницкий государственный педагогический университет
им. М. Коцюбинского,
ул. Острожского, 32,
21100 Винница, Украина*

***Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
ул. Боженко, 11,
03680, ГСП, Киев-150, Украина*

В широком интервале температур 77–1200 К впервые изучены акустические свойства новых сплавов Inconel 52 и Inconel 52MSS на основе системы NiCrFe. Установлено, что поведение высокотемпературного фона акустического поглощения согласуется с температурным интервалом провала пластичности в сплаве Inconel 52. Экспериментально установлено, что наличие более эффективных стопоров тормозящих дислокационную подвижность создаёт предпосылки для более равномерного распределения дислокаций, обуславливает отсутствие резких градиентов локальных

Corresponding author: Yuriy Aleksandrovich Semerenko
E-mail: semerenko@ilt.kharkov.ua

*B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, N.A.S. of Ukraine,
47 Nauki Ave., 61103 Kharkiv, Ukraine*

**M. Kotsiubynsky Vinnytsia State Pedagogical University,
32 Ostrozhskogo Str., 21100 Vinnytsia, Ukraine*

***The E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Bozhenko Ave., 03680 Kyiv-150, Ukraine*

Yu. A. Semerenko, O. V. Mozgovyj, L. V. Skibina, K. A. Yushchenko, G. V. Zviagintseva,
Acoustic Properties of New Alloys Inconel 52 and Inconel 52MSS in the Temperature
Range of 77–1200 K, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 37, No. 12: 1643–1652 (2015) (in
Russian).

напряжений, что в свою очередь обеспечивает более высокие показатели жаропрочности и горячей трещиностойкости сплава Inconel 52MSS по сравнению со сплавом Inconel 52. Показано, что акустические характеристики сплавов различных систем легирования позволяют устанавливать отличия в склонности к образованию горячих трещин.

Ключевые слова: сплавы Inconel 52 и Inconel 52MSS, прочность, пластичность, акустическое поглощение, динамический модуль упругости, жаропрочность, трещиностойкость, провал пластичности, горячие трещины.

У широкому інтервалі температур 77–1200 К вперше вивчено акустичні властивості нових стопів Inconel 52 та Inconel 52MSS на основі системи NiCrFe. Встановлено, що поведінка високотемпературного фону акустичного поглинання узгоджується з температурним інтервалом провалу пластичності в стопі Inconel 52. Експериментально встановлено, що наявність більш ефективних стопорів, що гальмують дислокаційну рухливість, створює передумови для більш рівномірного розподілу дислокацій, зумовлює відсутність різких градієнтів локальних напружень, що в свою чергу забезпечує більш високі показники жароміцності та гарячої трещиностійкості стопу Inconel 52MSS у порівнянні зі стопом Inconel 52. Показано, що акустичні характеристики стопів різних систем легування уможливають встановлювати відмінності в схильності до утворення гарячих трещин.

Ключові слова: стопи Inconel 52 та Inconel 52MSS, міцність, пластичність, акустичне поглинання, динамічний модуль пружності, жароміцність, трещиностійкість, провал пластичності, гарячі трещини.

The acoustic properties of the new alloys (Inconel 52 and Inconel 52MSS) based on the system of NiCrFe firstly investigated in a wide temperature range of 77–1200 K. As found in the Inconel 52, the behaviour of high-temperature background of acoustic absorption correlates with the temperature range of failure of the plasticity. As experimentally established, the availability of more effective pinning centres hindering the dislocation mobility creates the preconditions for a more uniform distribution of dislocations that leads to the absence of gradients of local stresses that, in turn, provides a high heat resistance and hot cracking resistance of the alloy Inconel 52MSS. As shown, the acoustic characteristics of alloys of different alloying systems allow establishing differences in the propensity for hot cracking.

Key words: Inconel 52 and Inconel 52MSS alloys, strength, ductility, acoustic absorption, elasticity modulus, heat resistance, crack resistance, failure of the plasticity, hot cracks.

(Получено 16 сентября 2015 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Сплав Inconel 690, разработанный корпорацией Special Metals — мировым лидером в разработке высокотехнологичных никелевых

сплавов и материалов для их сварки, характеризуется превосходной устойчивостью к различным агрессивным средам и высоким температурам. Повышенное содержание хрома обеспечивает высокую стойкость к окисляющим кислотам (в особенности к азотной и плавиковой), солям, а также стойкость к сероводородной коррозии при высоких температурах. Кроме того, данный сплав устойчив к межкристаллитной коррозии и межкристаллитному коррозионному растрескиванию, обладает высокой радиационной стойкостью и устойчивостью к радиационной коррозии. Помимо высокой коррозионной стойкости этот сплав характеризуется жаропрочностью и идеальными технологическими характеристиками. Это делает его оптимальным материалом для производства теплообменных трубок парогенераторов реакторов АЭС.

Сплавы Inconel 52 (In52) и Inconel 52MSS (In52MSS) на основе системы NiCrFe используется в качестве сварочных материалов для сварки изделий из Inconel 690 (In690), а также разнородных соединений из сплавов семейства Inconel и Incoloy с углеродистыми, низколегированными и нержавеющей стали [1]. Эти материалы позволяют получить высокопрочные соединения устойчивые к радиационной и химической коррозии.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В широкой области температур 77–1200 К нами впервые изучены температурные зависимости логарифмического декремента колебаний $\delta(T)$ и динамического модуля Юнга $E(T)$ сплавов Inconel 52 и Inconel 52MSS. Измерения выполнены в амплитудно-независимой области деформации двумя различными методами механической спектроскопии в двух взаимно перекрывающихся диапазонах температур: в области температур 77–390 К методом вынужденных резонансных изгибных колебаний консольно закреплённого образца [2, 3] на частоте 400 Гц и в области температур 293–1200 К методом свободных колебаний обратного крутильного маятника [2, 4] на частоте 0,4 Гц. В процессе измерений температура измерялась и стабилизировалась с точностью 50 мК. Скорость изменения температуры составляла ≈ 1 К/мин. Все измерения выполнены в отсутствие внешнего магнитного поля.

Образцы были получены автоматической многопроходной наплавкой (в атмосфере очищенного аргона с применением нерасходуемого вольфрамового электрода — TIG аргонодуговой сваркой) исследуемого сплава на подложку из сплава Inconel 690 (In690) (химический состав сплава Inconel 690 приведён в табл. 1 [5]). Внешний вид образцов после наплавки показан на рис. 1. Вид поперечных шлифов наплавки после травления в кислоте показан на рис. 2.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав сплава Inconel 690 [5].**TABLE 1.** Chemical composition of the alloy Inconel 690 [5].

Содержание элементов, % вес.							
C	Mn	Ni	Cr	Fe	S	Si	Cu
0,05	0.5	58	27–31	7–11	0,015	0,5	0,5

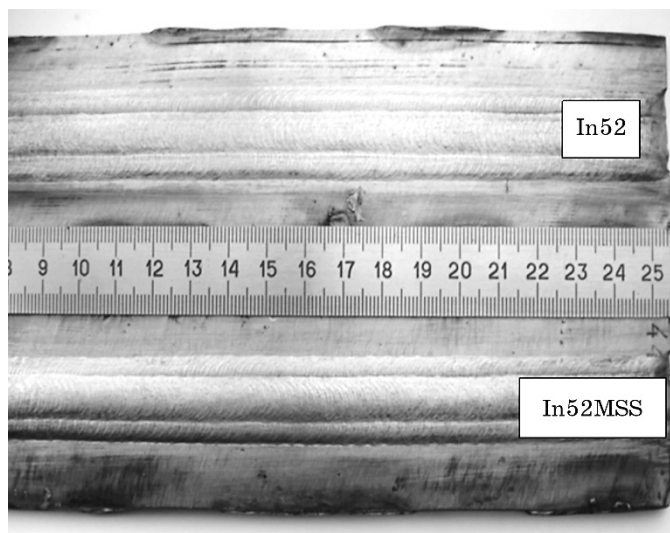


Рис. 1. Вид поверхности образца после наплавки многопроходными швами, выполненными TIG сваркой проволокой из сплавов Inconel 52 и Inconel 52MSS в атмосфере очищенного аргона.

Fig. 1. The surface of the sample after the multi-pass welding seams made TIG welding wire alloy Inconel 52 and Inconel 52MSS in an atmosphere of purified argon.

Из полученных массивных слитков электроискровой резкой с последующей механической шлифовкой и полировкой вырезались образцы для исследований (тонкие пластины размером $20 \times 3 \times 0,2$ мм³ для метода изгибных колебаний и прямоугольные стержни размером $65 \times 3 \times 3$ мм³ для метода крутильных колебаний). Химический состав изученных сплавов приведён в табл. 2.

В образцах сплава Inconel 52MSS наблюдается существенная химическая неоднородность по ниобию и молибдену (см. рис. 3). Области на границах зёрен обогащены ниобием и молибденом с выделением карбида ниобия. Плотность дислокаций в объеме зерна в сплаве Inconel 52 $\cong 4 \cdot 10^{10}$ см⁻², а в Inconel 52MSS — $\cong 5 \cdot 10^8$ см⁻² (см. рис. 4 и 5). При этом в Inconel 52 наблюдается значительное увели-

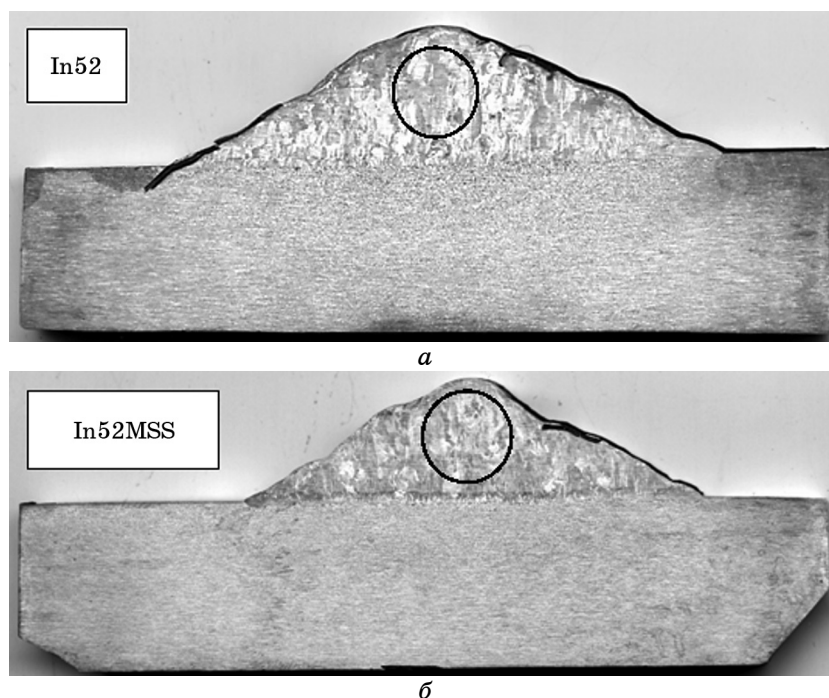


Рис. 2. Макроструктура многослойной наплавки изученными сплавами на подложку из Inconel 690: Inconel 52 (а), Inconel 52MSS (б). Кругом показано место вырезки заготовок для исследований.

Fig. 2. Macrostructure of multilayer deposition on a substrate of Inconel 690: Inconel 52 (a), Inconel 52MSS (b). Circle indicates the place of cutting the blanks for research.

чение плотности дислокаций при переходе от объёма зерна к границе ($\cong 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), что приводит к резкому градиенту локальных внутренних напряжений [6]. В то же время в Inconel 52MSS распределение локальных внутренних напряжений практически однородное, что может быть объяснено перераспределением внутренних напряжений вдоль межзёрненных границ в процессе диффузии дефектов к границам зёрен (блоков) [7].

Результаты акустических измерений приведены на рис. 6. Следует отметить, что результаты измерений, полученные двумя различными методами, хорошо согласуются в перекрывающейся области температур. Установлено, что при повышении температуры динамический модуль Юнга образцов монотонно понижается, а акустическое поглощение δ_b возрастает. При этом динамический модуль Юнга E в сплаве Inconel 52MSS на 20% больше, чем в сплаве Inconel 52 во всем интервале температур, что в соответствии с [8]

ТАБЛИЦА 2. Химический состав изученных сплавов Inconel 52 и Inconel 52MSS.**TABLE 2.** Chemical composition of the studied alloys Inconel 52 and Inconel 52MSS.

Сплав	Содержание элементов, % вес.													
	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	S	P	Ti	Al	Si	Cu	Mo-Nb
In52	0,026	0,24	58,82	28,91	10,53	0,03	0,04	<0,001	<0,004	0,55	0,66	0,15	0,02	0,07
In52MSS	0,023	0,31	осн.	29,49	8,49	2,51	3,51	0,0005	0,004	0,18	0,13	0,11	0,05	6,10

может быть объяснено повышенной плотностью дислокаций в сплаве Inconel 52. Общий ход температурной зависимости динамического модуля Юнга $E(T)$ удовлетворительно описывается в предположении аддитивного вклада фононной и электронной составляющих [9] (сплошные линии на рис. 6, а):

$$M(T) = M_0^{\text{AD}} - M_1 f(T/\Theta_D) - M_2 T^2, \quad (1)$$

где M_0^{AD} — адиабатический модуль упругости идеального кристалла при $T \rightarrow 0$ К, $M_1 f(T/\Theta_D)$ — дефект модуля, обусловленный тепловыми фононами, $M_2 T^2$ — дефект модуля, обусловленный тепло-

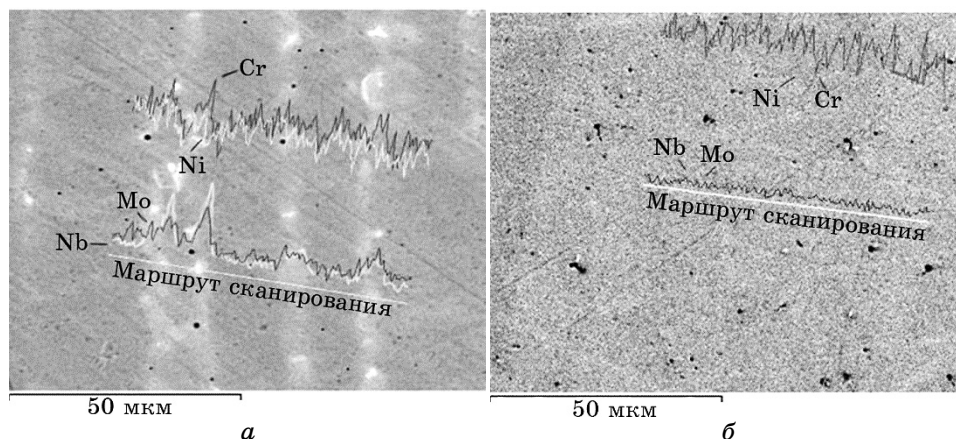


Рис. 3. Элементный микроанализ: сплав Inconel 52, не наблюдается химическая неоднородность (а); сплав Inconel 52MSS, наблюдается химическая неоднородность по ниобию и молибдену (б).

Fig. 3. Elemental microanalysis: Inconel 52, chemical homogeneity is observed (а); Inconel 52MSS, chemical inhomogeneity by niobium and molybdenum is observed (б).

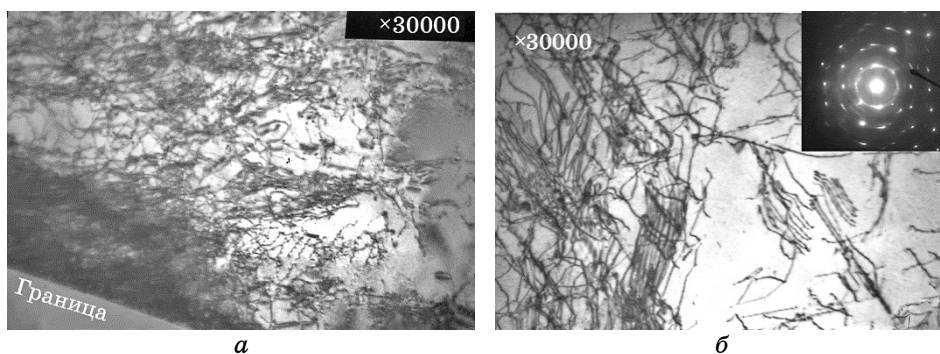


Рис. 4. Распределение дислокаций в сплаве Inconel 52 по данным микроэлектроннографии: приграничная зона (а), объём зерна (б).

Fig. 4. The distribution of dislocations in the alloy Inconel 52 according electron diffraction: the border zone (а), the bulk of grain (б).

вым движением электронов проводимости,

$$f\left(\frac{T}{\Theta_D}\right) = \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^4 \int_0^{\Theta_D/T} dx \frac{x^3}{e^x - 1},$$

а Θ_D — температура Дебая.

При температуре $\cong 170$ К в образцах сплавов Inconel 52 и Inconel 52MSS на температурной зависимости логарифмического декремента колебаний $\delta(T)$ наблюдается пик поглощения P_1 , кроме того в сплаве Inconel 52MSS при температуре $\cong 280$ К наблюдается пик по-

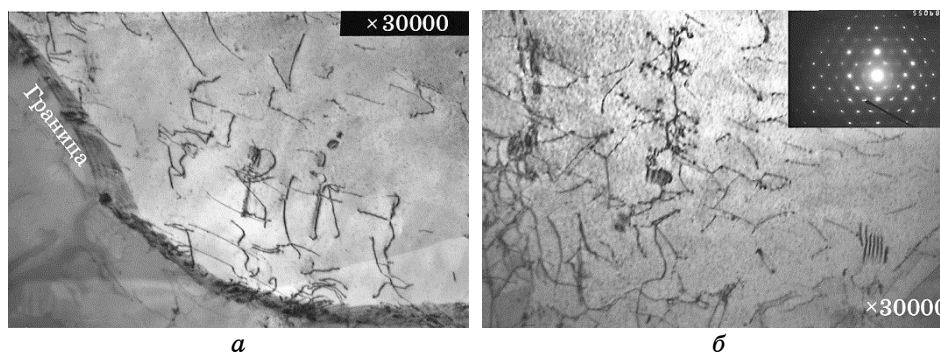


Рис. 5. Распределение дислокаций в сплаве Inconel 52MSS по данным микроэлектроннографии: приграничная зона (а), объём зерна (б).

Fig. 5. The distribution of dislocations in the alloy Inconel 52MSS according electron diffraction: the border zone (а), the bulk of grain (б).

глощения P_2 (см. рис. 6, *е*). Этим пикам отвечают характерные перегибы на зависимостях динамического модуля Юнга $E(T)$, что свидетельствует об их релаксационной природе. Микроскопические механизмы, ответственные за появление этих пиков в настоящее время обсуждаются.

Отсутствие на полученных температурных зависимостях акустических свойств особенностей, характерных для структурно-фазовых превращений, свидетельствует о стабильности структуры изученных сплавов в исследованном интервале температур.

Установлено, что поведение высокотемпературного фона акустического поглощения хорошо описывается в рамках предположения о термоактивируемом освобождении дислокационных линий с перегибами от точек закрепления [10–12] (сплошные линии на рис. 6,

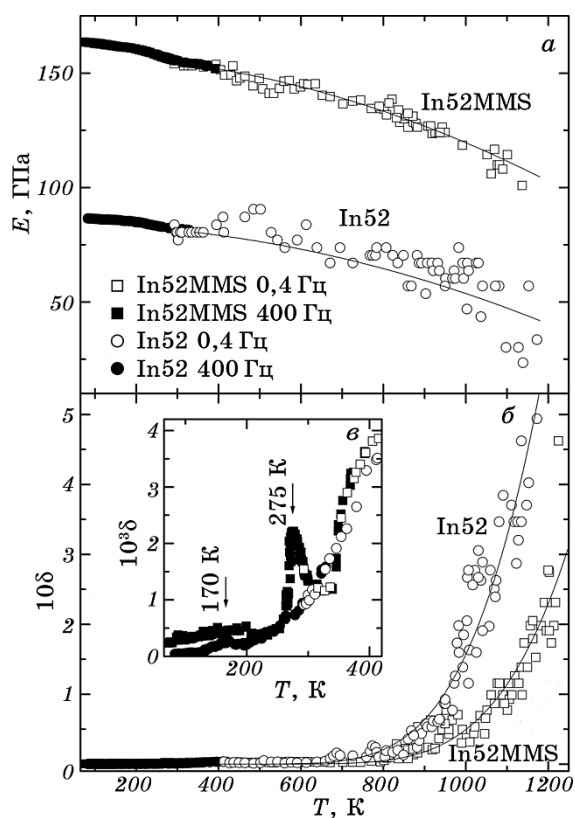


Рис. 6. Температурные зависимости динамического модуля Юнга E (а) и логарифмического декремента колебаний δ (б, в) сплавов Inconel 52 и Inconel 52MSS.

Fig. 6. The temperature dependences of the dynamic Young's modulus E (a) and logarithmic decrement δ (b, e) for Inconel 52 and Inconel 52MSS alloys.

б). В рамках этой теории предполагается, что поведение высокотемпературного фона акустического поглощения δ_b может быть описано формулой:

$$\delta_b \sim \delta_0 \exp(-U_b/kT), \quad (2)$$

где U_b имеет смысл энергии активации отрыва дислокаций от точек закрепления, а предэкспоненциальный фактор δ_0 пропорционален эффективной длине дислокационных сегментов.

Экспериментально установлено, что в сплаве Inconel 52MSS действуют более эффективные точки закрепления дислокационных сегментов с энергией активации отрыва $U_b = 0,8$ эВ, в то время как в сплаве Inconel 52 $U_b = 0,6$ эВ.

Известно [5], что в сплаве Inconel 52 наблюдается провал пластичности, где величина относительного удлинения ϵ имеет пониженные значения, с максимумом в интервале температур 1000–1200 К (см. рис. 7, а). Этот температурный интервал совпадает с температурным интервалом провала пластичности при образовании горячих трещин. В то же время в сплаве Inconel 52MSS этот провал пластичности не наблюдается (см. рис. 7, б).

Следует отметить, что поведение высокотемпературного фона акустического поглощения согласуется с температурным интервалом провала пластичности в сплаве Inconel 52, где величина относительного удлинения имеет пониженные значения.

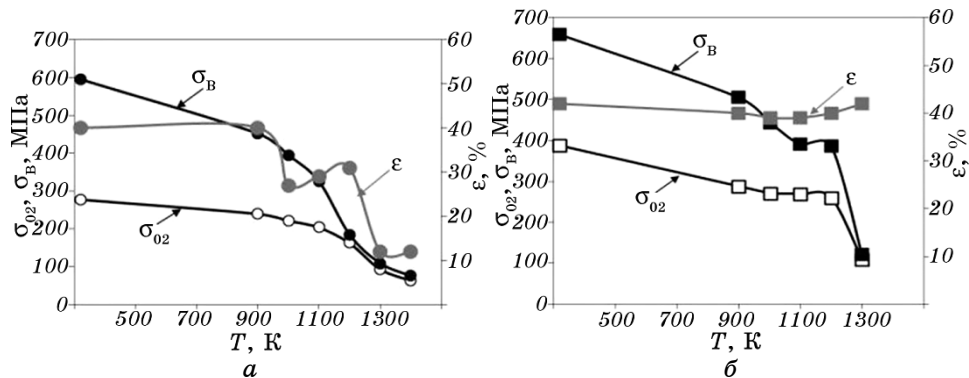


Рис. 7. Температурные зависимости прочности и пластичности сплавов Inconel 52 (а) и Inconel 52MSS (б) [5]: σ_{02} — предел текучести, σ_B — предел прочности, ϵ — относительное удлинение.

Fig. 7. The temperature dependences of the strength and plasticity of the Inconel 52 (a) and Inconel 52MSS alloys (b) [5]: σ_{02} —yield strength, σ_B —the ultimate strength, ϵ —elongation.

3. ВЫВОДЫ

1. Установлено, что поведение высокотемпературного фона акустического поглощения согласуется с температурным интервалом провала пластичности 1000–1200 К в сплаве Inconel 52, где величина относительного удлинения имеет пониженные значения.
2. Экспериментально установлено, что наличие более эффективных стопоров тормозящих дислокационную подвижность создаёт предпосылки для более равномерного распределения дислокаций, обуславливает отсутствие резких градиентов локальных напряжений, что в свою очередь обеспечивает более высокие показатели жаропрочности и горячей трещиностойкости сплава Inconel 52MSS по сравнению со сплавом Inconel 52.
3. Показано, что акустические характеристики сплавов различных систем легирования позволяют устанавливать отличия в их склонности к образованию горячих трещин.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

1. R. Zhang, S. D. Kiser, and B. A. Baker, *A New NiCrFe Welding Product—Inconel 52MSS Provides Optimum Resistance to PWSCC and DDC*, www.specialmetalswelding.com.
2. A. S. Nowick and B. S. Berry, *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids* (New York–London: Academic Press: 1972).
3. H. M. Simpson and A. Sosin, *Rev. Sci. Instrum.*, **48**, Iss. 11: 1392 (1977).
4. M. S. Blanter, I. S. Golovin, H. Neuhäuser, and H.-R. Sinning, *Internal Friction in Metallic Materials: A Handbook* (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag: 2007).
5. [www.specialmetals.com/documents/Inconel alloy 690.pdf](http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20690.pdf)
6. K. Yushchenko, V. Savchenko, G. Zviagintseva., N. Chervjakov, I. Volosatov, Yu. Semerenko, and L. Skibina, *Proc. of 55 Int. Conf. 'Actual Problems of Strength 2014' (June 9–13, 2014, Kharkiv, Ukraine)*, p. 189.
7. I. M. Lifshitz, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **17**, No. 4: 910 (1963) (in Russian).
8. A. Granato and K. Lücke, *J. Appl. Phys.*, **27**: 583 (1956).
9. G. Leibfried, *Gittertheorie der Mechanischen und Thermischen Eigenschaften der Kristalle* [Lattice Theory the Mechanical and Thermal Properties of the Crystals], *Handbuch der Physik, vol. 7/1, Crystal Physics I* (Berlin–Heidelberg: Springer: 1955), p. 104 (in German).
10. W. P. Mason, *Phys. Rev.*, **98**: 1136 (1955).
11. D. Niblett and J. Wilks, *Advances in Physics*, **9**, No. 33: 1 (1960).
12. B. I. Shapoval and V. M. Arzhavitin, *Mekhanizmy Vysokotemperaturnogo Fona Vnutrennego Treniya Metallov* [The Mechanisms of High-Temperature Background of Internal Friction of Metals] (Moscow: TsNIIatominform: 1988) (in Russian).