

## СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ И МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

PACS numbers: 61.72.Ff, 61.72.Hh, 62.20.-x, 62.25.-g, 62.40.+i, 81.20.Ev, 81.40.Jj

### **Inconel MA758: новый наноструктурный суперсплав. Акустические и механические свойства в интервале температур 4,2–310 К**

К. А. Ющенко, Ю. А. Семеренко\*, Е. Д. Табачникова\*,  
А. В. Подольский\*, Л. В. Скибина\*, С. Н. Смирнов\*, В. С. Савченко

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
ул. Боженко, 11,  
03680, ГСП, Киев-150, Украина*  
*\*Физико-технический институт низких температур  
им. Б. И. Веркина НАН Украины,  
просп. Ленина, 47,  
61103 Харьков, Украина*

В области температур 4,2–310 К впервые изучены механические и акустические свойства нового наноструктурного сплава Inconel MA758, полученного механическим легированием дисперсными наночастицами оксида иттрия  $Y_2O_3$ . Показано, что в интервале температур 4,2–310 К суперсплав Inconel MA758 обладает стабильной структурой и достаточно высокими показателями прочности и пластичности.

В інтервалі температур 4,2–310 К вперше вивчено механічні та акустичні властивості нового наноструктурного сплаву Inconel MA758, одержаного механічним легуванням дисперсними наночастинками оксиду ітрію  $Y_2O_3$ . Встановлено, що в інтервалі температур 4,2–310 К суперсплав Inconel MA758 має стабільну структуру та досить високі показники міцності та пластичності.

Mechanical and acoustical properties of the new nanostructured Inconel MA758 alloy fabricated by mechanical alloying with disperse nanoparticles of yttrium oxide  $Y_2O_3$  are studied for the first time within the temperature range 4.2–300 K. As shown, the Inconel MA758 superalloy has a stable microstructure and sufficiently high strength and plasticity at temperatures of 4.2–300 K.

**Ключевые слова:** суперсплав Inconel MA758, прочность, пластичность, акустическое поглощение, динамический модуль упругости.

(Получено 11 июля 2012 г.)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой в разработке конструкционных материалов с повышенной прочностью и пластичностью является обеспечение их стабильности и однородности физико-механических свойств во всем интервале температур эксплуатации от криогенных и вплоть до предплавильных температур.

В настоящее время наиболее перспективным путем решения этой проблемы является упрочнение базового сплава дисперсными наночастицами тугоплавких оксидов. Такие материалы принято называть ODS (oxide dispersion strengthened) сплавами. Базой для ODS-сплавов наиболее часто служат аустенитные суперсплавы на основе Ni, Cr и Fe. В качестве упрочняющих частиц, как правило, используют оксиды  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BeO}$  и  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . ODS-суперсплавы на основе оксида иттрия  $\text{Y}_2\text{O}_3$  были разработаны в 90-х годах прошлого века. Их получают методом механического легирования, который включает следующие стадии: 1) совместное перемалывание в шаровых мельницах 5-микронных порошков исходных компонент суперсплава (см. рис. 1, а) с добавлением мелкодисперсных конгломератов (каждая из гранул размером 1 мкм состоит из большого количества 20–40 нм частиц)  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (см. рис. 1, б); 2) запайка дегазированного порошка в герметичный

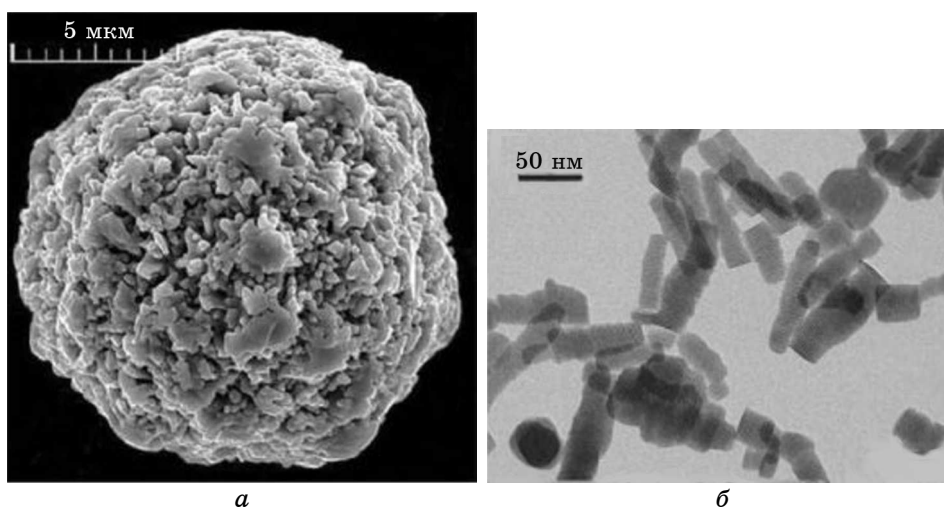
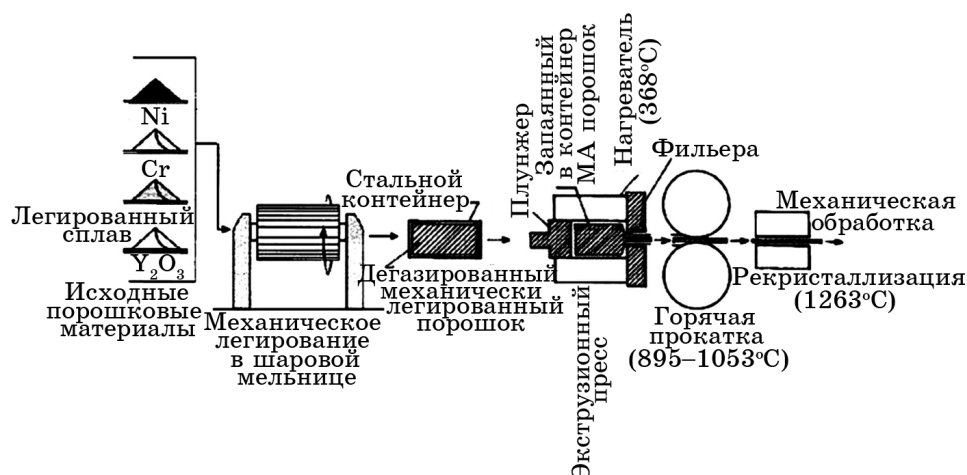


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения порошков Ni (а) и  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (б) [1].



**Рис. 2.** Получение ODS-суперсплава Inconel MA758 методом механического легирования [1].

стальной контейнер; 3) компактирование экструзией; 4) горячая опрессовка; 5) зонная рекристаллизация [1, 2] (см. рис. 2).

Одним из возможных направлений применения ODS-суперсплавов с механическим легированием является их использование в качестве присадочного сварочного материала для сварки наноструктурированных сплавов. Основная идея такого применения основана на отсутствии существенной деградации структуры и свойств ODS-суперсплавов с механическим легированием в зоне сварного шва.

Физико-механические свойства суперсплава Inconel MA758 при температурах выше комнатной были подробно изучены ранее [3–5]. Микроструктура суперсплава Inconel MA758 показана на рис. 3 [1].

В настоящей работе впервые в области температур 4,2–310 К изучены акустические и механические свойства нового суперсплава Inconel MA758 на основе системы никель–хром, полученного механическим легированием и упрочненного дисперсными наночастицами оксида иттрия  $Y_2O_3$ . Основная цель данной работы — получить экспериментальные данные о прочности и пластичности данного сплава в области низких температур.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ

Методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа был определен фактический состав изученного образца суперсплава Inconel MA758: (29,5±0,4)% Cr, (0,8±0,06)% Fe, (62,7±0,4)% Ni, (4,6±0,09)% Cu, (2,03±0,07)% Zn, (0,5±0,03)% Y.

Механические измерения выполнены путем одноосного сжатия

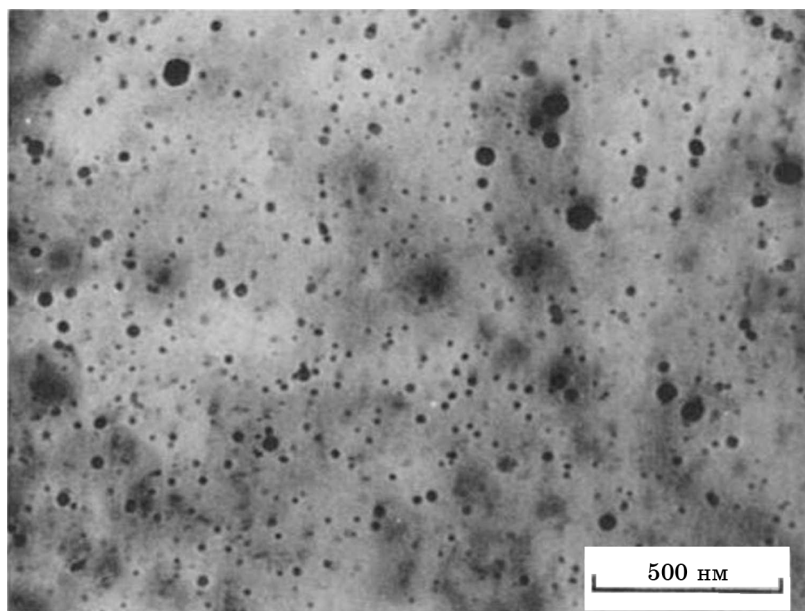


Рис. 3. Микроэлектронграмма рекристаллизованного суперсплава Inconel MA758 [1].

при скорости относительной деформации  $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  при температурах 300, 77 и 4,2 К. Образцы для механических испытаний имели форму прямоугольных призм с размерами  $3,3 \times 2,0 \times 1,9$  мм. Деформация проводилась на машине МРК-3 производства ФТИНТ НАН Украины (жесткость машины  $7 \cdot 10^6$  Н/м). В ходе экспериментов регистрировались зависимости нагрузка–время, которые потом пересчитывались в диаграммы «напряжение–пластическая деформация», из которых определялись условный предел текучести, максимально достигнутое напряжение и пластическая деформация. Напряжение рассчитывалось как отношение нагрузки к первоначальной площади поперечного сечения образца. Значение деформации определялось как отношение изменения длины образца, обусловленного пластической деформацией, к его первоначальной длине.

Акустические измерения выполнены методом механической резонансной спектроскопии на частоте 3,3 кГц в амплитудно-независимой области звуковой деформации  $\sim 10^{-7}$ . Изгибные колебания свободного образца возбуждались электростатическим методом. Акустические измерения проводились в отсутствие внешнего магнитного поля. Температура стабилизировалась с точностью  $< 50$  мК при помощи AsGa-термометра в области температур 5–50 К и Si-константановой термопары при 50–310 К и изменялась со ско-

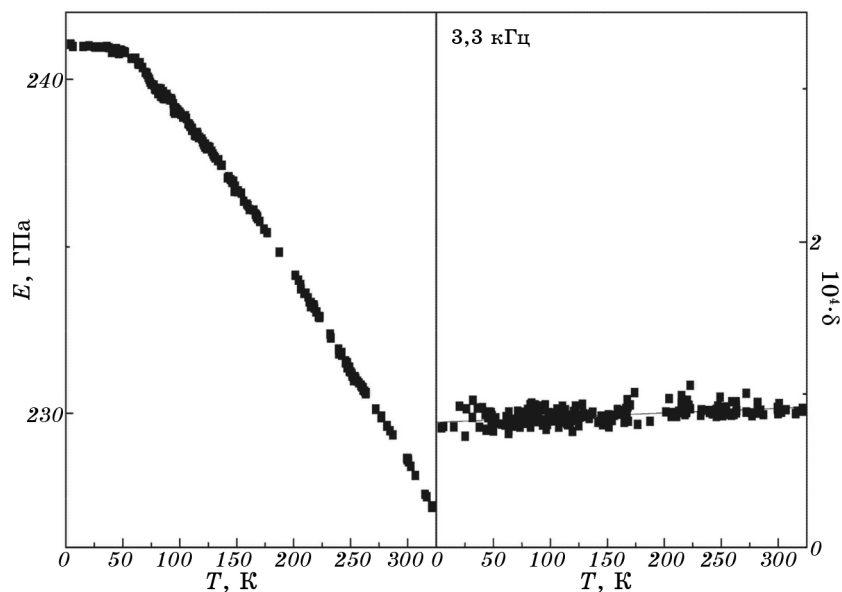
ростью  $\cong 1$  К/мин.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА. ОБСУЖДЕНИЕ

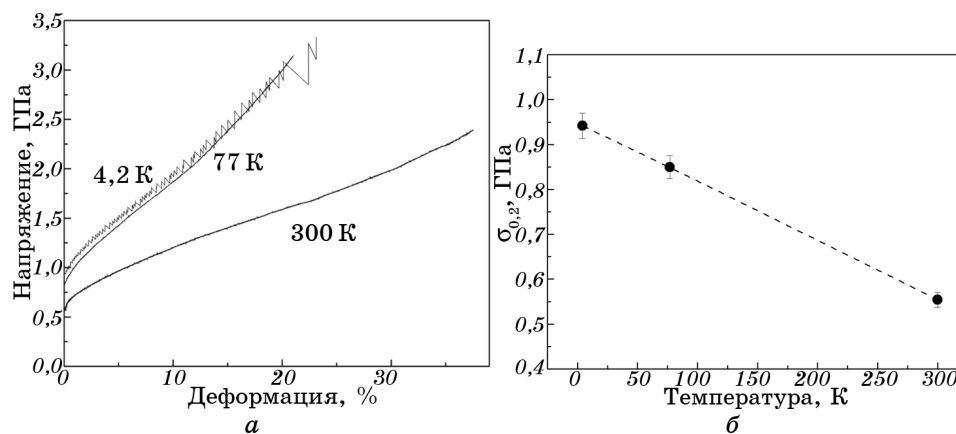
Экспериментальные данные можно разделить на две группы, относящиеся к акустическим свойствам (рис. 4) и механическим (рис. 5) изученного суперсплава.

При изучении акустических свойств установлено, что при повышении температуры от 4,2 К до 300 К модуль Юнга образца монотонно понижается от 241 ГПа до 227 ГПа, а поглощение линейно возрастает (рис. 4). При этом на температурных зависимостях акустического поглощения и модуля упругости не наблюдаются какие-либо особенности релаксационной природы, что, вероятно, связано с блокировкой динамических дислокационных процессов дисперсными наночастицами оксида иттрия  $Y_2O_3$ .

На рисунке 5, а показаны деформационные кривые суперсплава Inconel MA758, полученные в режиме одноосного сжатия. При всех исследованных температурах на деформационных кривых наблюдаются две основные стадии пластической деформации: при деформациях менее 3–5% наблюдается параболическая зависимость напряжения от деформации, которая потом сменяется протяженным линейным участком. При температуре 4,2 К на деформацион-



**Рис. 4.** Температурные зависимости модуля Юнга  $E$  (а) и логарифмического декремента колебаний  $\delta$  (б) суперсплава Inconel MA758.



**Рис. 5.** Механические свойства суперсплава Inconel MA758 при одноосном сжатии: деформационные кривые при температурах 300, 77, 4,2 К (а); температурная зависимость предела текучести (б).

ной кривой наблюдается скачкообразная деформация, которая начинается практически после условного предела текучести и продолжается на всех последующих стадиях деформации с монотонным увеличением амплитуды скачков.

При понижении температуры от 300 К до 4,2 К предел текучести образцов повышается и при температурах 300, 77 и 4,2 К составляет 555, 850 и 940 МПа, соответственно. Увеличение значений предела текучести при понижении температуры от 300 до 4,2 К составляет 70% (рис. 5, б), что значительно превышает изменения модулей упругости в этом интервале температур. Соответственно, наблюдаемая температурная зависимость предела текучести свидетельствует о термоактивируемом характере пластической деформации. При всех исследованных температурах пластичность сплава сохраняется на достаточно высоком уровне до деформаций  $\cong 20\text{--}30\%$ .

#### 4. ВЫВОДЫ

Известно, что структурно-фазовые превращения сопровождаются появлением пика акустического поглощения, температура локализации которого соответствует температуре превращения. Как правило, температуры прямого и обратного превращения не совпадают, и на температурной зависимости модуля упругости наблюдается гистерезисная петля, а температура локализации пика акустического поглощения меняется при нагреве и охлаждении [6–8]. Отсутствие на полученных температурных зависимостях акустического поглощения и модуля упругости особенностей и гистерезис-

ных петель, характерных для структурно-фазовых превращений, свидетельствует о стабильности структуры изученного суперсплава в исследованном интервале температур.

Установлено, что в интервале температур 4,2–310 К суперсплав Inconel MA758 обладает стабильной структурой и достаточно высокими прочностью и пластичностью. На основании анализа температурных зависимостей модуля Юнга и предела текучести исследуемого сплава сделан вывод о термоактивируемом характере пластической деформации в интервале температур 4,2–300 К.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. P. R. Soni, *Mechanical Alloying: Fundamentals and Applications* (Cambridge: Cambridge International Science Publishing: 2000).
2. *Handbook of non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications* (Eds. O. D. Neikov, S. S. Naboychenko, and G. Dowson) (Amsterdam: Elsevier: 2009).
3. *Special Metals Corporation Company Brochure: Inconel Alloy MA758* (Special Metals Corporation Company: 2004).
4. *Inconel Alloy Ma758, Alloy Diag., ASM International*, Rev. May (1996).
5. *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt and Their Alloys* (Ed. J. R. Davis) (Materials Park, OH: ASM International: 2000).
6. В. С. Постников, *Внутреннее трение в металлах* (Москва: Металлургия: 1974).
7. С. П. Никаноров, Б. К. Кардашев, *Упругость и дислокационная неупругость кристаллов* (Москва: Наука: 1985).
8. А. Новик, Б. Берри, *Релаксационные явления в кристаллах* (Москва: Атомиздат: 1975).