

PACS numbers: 61.72.Ff, 62.23.St, 62.40.+i, 62.65.+k, 81.07.Bc, 81.20.Ev, 81.40.Jj

## Исследование физико-механических свойств нового наноструктурного суперсплава Inconel MA758 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 Киев, Украина*

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

В интервале 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  $Y_2O_3$ . Показано, 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 alloy INCONEL MA758 fabricated by the mechanical alloying with  $Y_2O_3$  yttrium oxide disperse nanoparticles are studied for the first time. As shown, the superalloy INCONEL MA758 has a stable microstructure and rather high strength and plasticity within the temperature range of 4.2–300 K investigated.

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

*(Получено 18 ноября 2010 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой в разработке конструкционных материалов является обеспечение их стабильности и однородности физико-механических свойств во всем интервале температур эксплуатации от криогенных и вплоть до предплавления 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 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 мкм порошков исходных компонент суперсплава (см. рис. 1, а) с добавлением мелкодисперсных конгломератов (каждая из 1 мкм гранул состоит из большого количества 20–40 нм частиц)  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (см. рис. 1, б); 2) запайка дегазированного порошка в герметичный стальной контейнер; 3) компактирование экструзией; 4) горячая опрессовка; 5) зонная переплавка [1, 2] (см. рис. 2).

Одним из возможных направлений использования 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

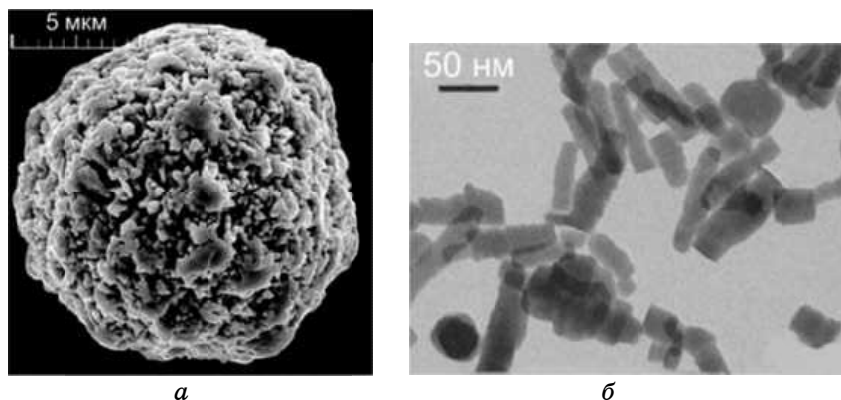
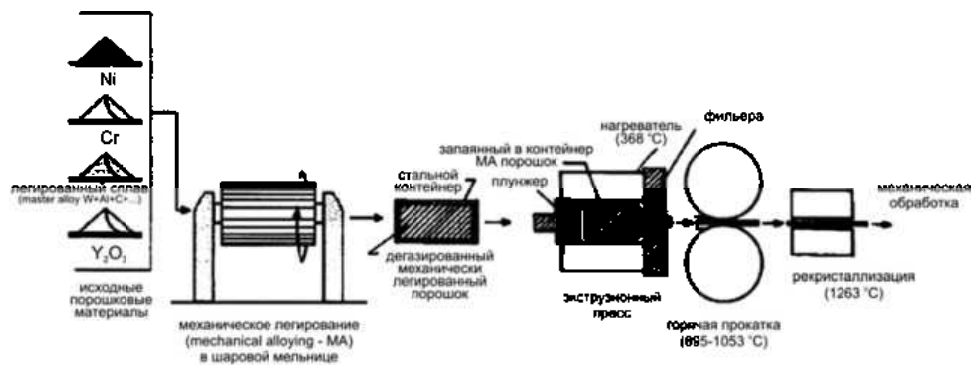
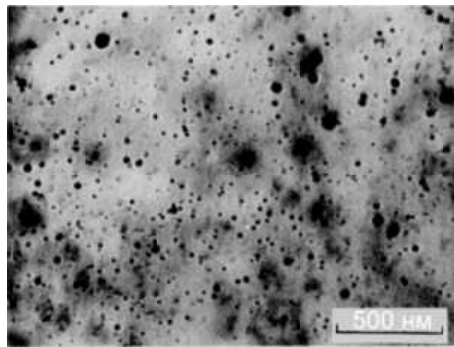


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения порошков Ni (а) и  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (б) [1].



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



**Рис. 3.** Микроэлектрограмма рекристаллизованного суперсплава Inconel MA758 [1].

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 ( $Ni + 30\% Cr + 0,5\% W + 0,3\% Al + 0,05\% C + 0,6\% Y$ ), полученного механическим легированием дисперсными наночастицами оксида иттрия  $Y_2O_3$ .

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ

Фактический состав изученного образца суперсплава Inconel MA758 был определен методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа: Cr  $29,5 \pm 0,4\%$ , Fe  $0,8 \pm 0,06\%$ , Ni  $62,7 \pm 0,4\%$ , Cu

$4,6 \pm 0,09\%$ ,  $Zn\ 2,03 \pm 0,07\%$ ,  $Y\ 0,5 \pm 0,03\%$ .

Механические измерения выполнены путем одноосного сжатия при скорости относительной деформации  $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  при температурах 4,2, 77 и 300 К. Образцы для механических испытаний имели форму прямоугольных призм с размерами  $3,3 \times 2,0 \times 1,9$  мм. Деформация выполнялась на машине МРК-3 производства ФТИНТ НАН Украины (жесткость машины  $7 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ). В ходе экспериментов регистрировались зависимости нагрузка–время, которые потом пересчитывались в диаграммы «напряжение–пластическая деформация», из которых определялись условный предел текучести, максимальное достигнутое напряжение и 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  $\cong 10^{-7}$ . Изгибные колебания свободного образца возбуждались электростатическим методом. Акустические измерения выполнялись в отсутствие внешнего магнитного поля. Температура стабилизировалась с точностью  $< 50 \text{ мК}$  при помощи AsGa термометра в области температур 5–50 К и Си-константановой термопары при 50–310 К и изменялась со скоростью  $\cong 1 \text{ К/мин}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА, ОБСУЖДЕНИЕ

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

На деформационных кривых наблюдаются две основные стадии пластической деформации: при деформациях менее 3–5% наблюдается параболическая зависимость напряжения, которая потом сменяется протяженным линейным участком. При температуре 4,2 К на деформационной кривой наблюдается скачкообразная деформация, которая начинается практически после условного предела текучести и продолжается на всех последующих стадиях деформации с практически монотонным увеличением амплитуды скачков.

При понижении температуры от 300 до 4,2 К предел текучести образцов повышается: условный предел текучести при температурах 300, 77 и 4,2 К составляет 555, 850 и 940 МПа соответственно. При всех исследованных температурах пластичность сплава Inconel MA758 сохраняется на достаточно высоком уровне: при температуре 4,2 К разрушение образцов происходило при пластической деформации 20%, а при более высоких температурах разру-

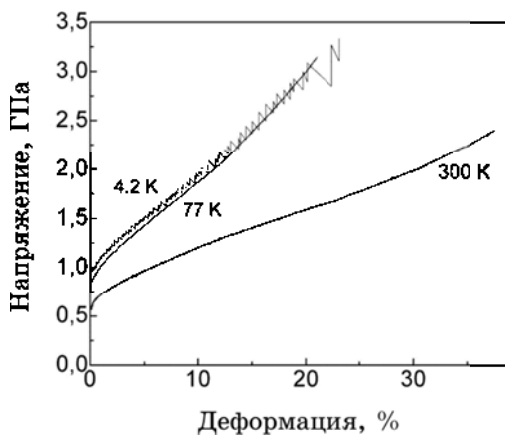


Рис. 4. Механические свойства суперсплава Inconel MA758.

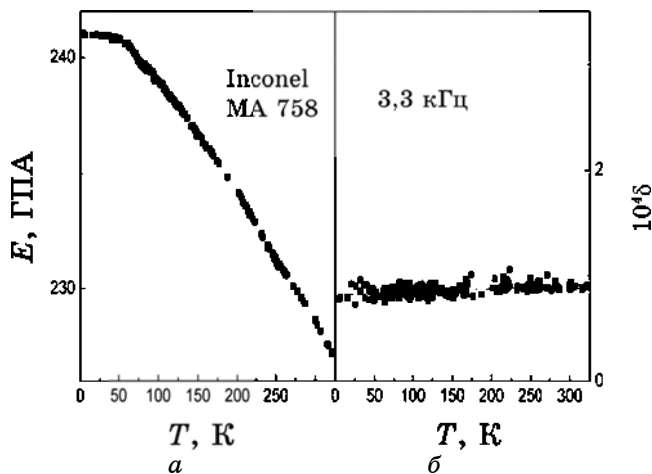


Рис. 5. Температурные зависимости модуля Юнга  $E$  (а) и логарифмического декремента колебаний  $\delta$  (б) суперсплава Inconel MA758.

шение образцов не происходило до значений деформации 30% и деформирование образцов прекращалось из-за значительного изменения формы образцов.

При изучении акустических свойств установлено, что при повышении температуры от 4,2 до 300 К модуль Юнга образца монотонно понижается от 241 ГПа до 227 ГПа, а поглощение линейно возрастает. 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  $Y_2O_3$ .

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

Таким образом, в интервале температур 4,2–310 К суперсплав Inconel MA758 обладает стабильной структурой и достаточно высокими показателями прочности и пластичности.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. P. R. Soni, *Mechanical Alloying: Fundamentals and Applications* (Cambridge, England: Cambridge International Science Publishing: 2000).
2. *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications* (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* (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).