

УДК 621.74.045:669.24:621.984

О. С. Сергієнко, канд. тех. наук Г. А. Бялік, д-р техн. наук В. І. Гонтаренко

Запорізький національний технічний університет

## ВПЛИВ РІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ $\gamma'$ -ФАЗИ НА МІЦНІСТЬ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ДО І ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ

У статті запропоновано методику визначення рівномірності розподілу  $\gamma'$ -фази, а також результати досліджень її впливу на міцність жароміцних нікелевих сплавів. Визначено теоретичну залежність міцності від рівномірності розподілу  $\gamma'$ -фази.

**Ключові слова:** міцність, нікелевий сплав, структура,  $\gamma'$ -фаза, рівномірність розподілу.

### Вступ

Властивості жароміцних сплавів визначаються комплексом факторів, до яких слід віднести об'ємний вміст  $\gamma'$ -фази, розмір її часток, твердорозчинне зміцнення  $\gamma'$ -фази і металевої  $\gamma$ -матриці, дисперсність карбідів і розмір зерен.

Однак найбільш суттєвий вклад у жароміцність нікелевих сплавів вносить  $\gamma'$ -фаза, завдяки підвищенню границі текучості при збільшенні температури до 700–800 °С [1].

Інтерметалідна  $\gamma'$ -фаза на основі з'єднання  $Ni_3Al$  є основною структурною складовою сучасних жароміцних сплавів. У склад  $\gamma'$ -фази також можуть входити титан, ніобій, хром, молібден, вольфрам, кобальт та інші елементи. Її об'ємний вміст у сплавах, що застосовуються для лиття робочих лопаток турбін I і II ступенів, досягає 60–65 % [2].

Але на міцність жароміцних нікелевих сплавів впливає не тільки розмір часток зміцнюючої  $\gamma'$ -фази, але і особливості її розподілу у об'ємі металу. До цих особливостей, у першу чергу, слід віднести рівномірність її розподілу.

### Методика досліджень

На сьогоднішній день не існує будь-якого критерію для оцінки рівномірності розподілу  $\gamma'$ -фази у металевій матриці жароміцних сплавів. Але, слід відмітити, що існують металографічні методи, які дозволяють визначити загальний вміст будь-якої фази відносно металевої матриці, наприклад, метод «Л», ГОСТ 1778-80.

Якщо за допомогою цього методу визначити індекс  $\gamma'$ -фази на двох лініях однакової довжини, проведених через зображення мікроструктури, за формулами:

$$I_{\gamma' \min} = \frac{I_{1\gamma'}}{L_{заг}} \quad I_{\gamma' \max} = \frac{I_{2\gamma'}}{L_{заг}}, \quad (1)$$

де  $I_{\gamma'}$  – сумарна довжина часток  $\gamma'$ -фази на даній лінії, мм;

$L_{заг}$  – загальна довжина зразка, що розглядається, мм.

За критерій рівномірності розподілу  $\gamma'$ -фази можна прийняти відношення

$$K_{\eta\gamma'} = \frac{I_{\gamma' \min}}{I_{\gamma' \max}}. \quad (2)$$

В ідеальному випадку, при цілком врівноваженому розподілі  $\gamma'$ -фази по об'єму металу, індекс  $\gamma'$ -фази повинен бути однаковим для усіх пересічних ліній. При цьому коефіцієнт розподілу  $K_{\eta\gamma'} = 1$ , тобто  $\gamma'$ -фаза розподілена максимально рівномірно.

Для визначення граничної похибки розрахунків коефіцієнту розподілу  $\gamma'$ -фази використовуємо ГОСТ 1778-80.

Спочатку визначається середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum a^2}{n-1}}, \quad (3)$$

де  $\sum a^2$  – сума квадратів відхилень від середнього значення сумарної довжини часток  $\gamma'$ -фази на кожній лінії;

$n$  – кількість ліній.

Граничну похибку коефіцієнту розподілу визначаємо за формулою:

$$\sigma_{ox} = \pm \frac{\sigma \cdot 1,65}{\sqrt{L}}, \quad (4)$$

де  $L$  – довжина зразка, що розглядається, мм.  
 Для визначення впливу рівномірності розподілу  $\gamma'$ - фази на міцність нікелевих сплавів, використано 4 зразка нікелевих жароміцних сплавів, виконаних за різними технологіями:

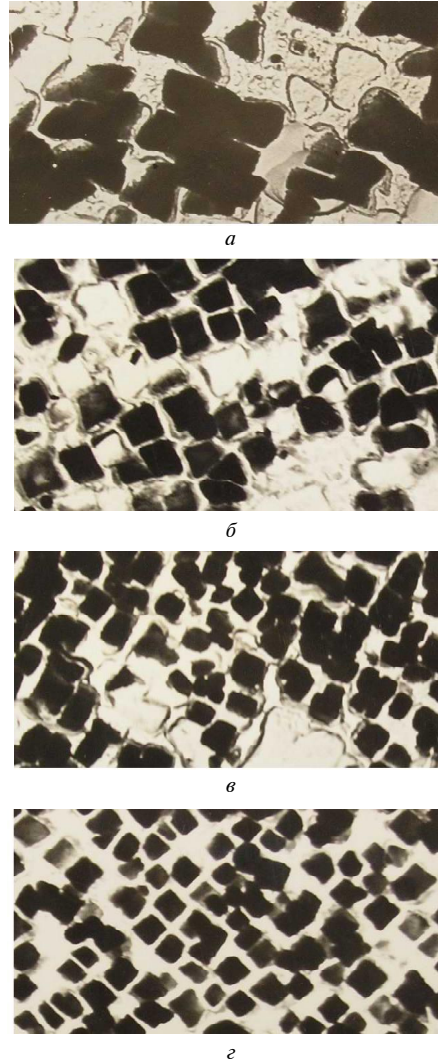
- 1) литий зразок;
- 2) литий зразок з термообробкою;
- 3) литий зразок після ГІП;
- 4) литий зразок після ГІП і термообробки.

Для кожного зі зразків визначено механічні властивості: межу міцності, відносне подовження, відносне звуження і тривалу міцність. Також виготовлено шліфи для металографічного дослідження на растровому електронному мікроскопі, фотографії мікроструктури наведено на рисунку 1.

Результати розрахунків за наведеною методикою, зведено у таблицю 1.

**Таблиця 1** – Результати розрахунку коефіцієнта рівномірності розподілу  $\gamma'$ - фази

№ зразка	$L_{зраз}$ , мм	№ лінії	$L$ , мм	$I_{\gamma'}$	$K_n$
1	115	1	66	0,5739	0,3864
		2	80	0,6957	
		3	88	0,7652	
		4	34	0,2957	
		5	47	0,4087	
2	137	1	86	0,6277	0,6305
		2	79	0,5766	
		3	58	0,4234	
		4	92	0,6715	
		5	79	0,5766	
3	125	1	85	0,68	0,5806
		2	93	0,744	
		3	54	0,432	
		4	68	0,544	
		5	73	0,584	
4	130	1	66	0,5077	0,8649
		2	74	0,5692	
		3	64	0,4923	
		4	69	0,5308	
		5	65	0,5	
Гранична похибка – 1,088%					



**Рис. 1.** Морфологія і розмір  $\gamma'$ - фази у зразках, виконаних за різними технологіями:

$a$  – литий зразок,  $б$  – зразок після термообробки,  $в$  – зразок після ГІП,  $г$  – зразок після ГІП і термообробки

Ці розрахунки підтверджують, що після проведення ГІП рівномірність розподілу часток  $\gamma'$ - фази збільшується відносно литого стану, однак дещо поступається литому зразку після термообробки. Максимальний ефект досягається проведенням ГІП з подальшою термообробкою, у такому випадку коефіцієнт розподілу наближається до одиниці.

Для металографічних розрахунків допустимою є похибка до 10 %, отже розрахунки проведено з достатньою точністю, і їх результатами можна користуватися для подальших досліджень.

Для наочності взаємозв'язку між міцністю ( $\sigma_B$ ) і рівномірністю розподілу  $\gamma'$ - фази або розміром відстаней між частинками  $\gamma'$ - фази ( $D$ ) побудовано залежність (рис. 2).

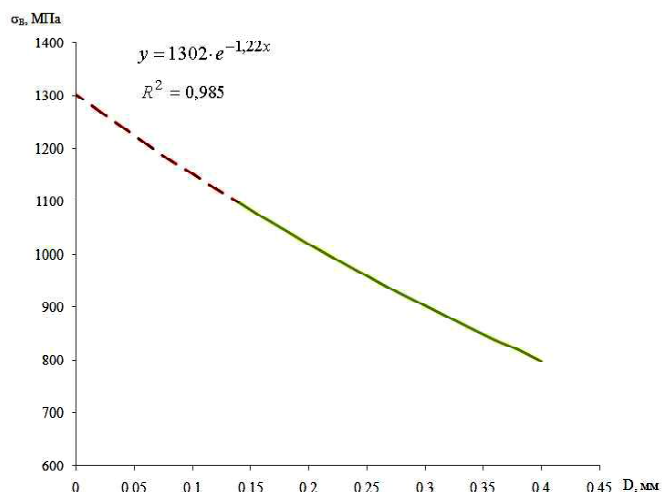


Рис. 2. Залежність міцності нікелевих сплавів від відстані між частинками  $\gamma'$  - фази

Аналіз залежності підтверджує розрахункові дані, адже при рівномірному розподілі часток  $\gamma'$  - фази у металевій матриці, відстані між ними менші, ніж при нерівномірному розподілі. При цьому, при збільшенні міжчасткових відстаней міцність сплаву зменшується згідно з кривою на графіку.

Область графіку, виконана пунктирною лінією, відповідає теоретичним даним, через те, що досягти розміру часток  $\gamma'$  - фази і відстаней між ними менше 0,16 мкм на сьогоднішній день є практично неможливим.

#### Висновки

Таким чином, було встановлено, що ступінь рівномірності розподілу  $\gamma'$  - фази суттє-

во впливає на міцність жароміцних нікелевих сплавів. Найбільша рівномірність спостерігається у зразку № 4, що пройшов ГІП і термічну обробку, відповідно саме цей зразок має найвищі механічні властивості.

#### Перелік посилань

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Е. Н. Каблов – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД, часть II / [Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк и др.]. – Запорожье: изд-во ОАО «Мотор Сич», 2003. – 496 с.

Поступила в редакцию 18.06.2010

#### Сергиенко О.С., Бялик Г.А., Гонтаренко В.И. Влияние равномерности распределения $\gamma'$ -фазы на прочность никелевых сплавов до и после горячего изостатического прессования

*В статье предложена методика определения равномерности распределения  $\gamma'$ -фазы, а также результаты изучения ее влияния на прочность жаропрочных никелевых сплавов. Определена теоретическая зависимость прочности от равномерности распределения  $\gamma'$ -фазы.*

**Ключевые слова:** прочность, никелевый сплав, структура,  $\gamma'$ -фаза, равномерность распределения.

#### Sergiienko O., Bialik G., Gontarenko V. The influence of $\gamma'$ -phase distribution factor on the strength of nickel alloys before and after hot isostatic pressing

*The article covers the method of  $\gamma'$ -phase distribution factor evaluation and the research results of its influence on the strength of heat-proof nickel alloys. The theoretical functional connection between strength and  $\gamma'$ -phase distribution factor is described.*

**Key words:** strength, nickel alloy, structure,  $\gamma'$ -phase, distribution factor.