

УДК 669.017

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН ПО МИКРОСТРУКТУРЕ

**И.П. Гладкий, профессор, к.т.н., В.П. Тарабанова, доцент, к.т.н., Э.Б. Хоботова, профессор, д.хим.н., ХНАДУ, Л.Д. Мищенко, ст. науч. сотр., к.т.н., Турбоатом**

***Аннотация.** Установлена взаимосвязь между структурным состоянием жаропрочного никелевого сплава и механическими свойствами. Определены требования к структуре сплава.*

***Ключевые слова:** никелевый сплав,  $\gamma'$ -фаза, карбиды, пластичность, ударная вязкость, длительная прочность.*

## ОЦІНКА ЯКОСТІ МЕТАЛУ ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН ЗА МІКРОСТРУКТУРОЮ

**І.П. Гладкий, професор, к.т.н., В.П. Тарабанова, доцент, к.т.н., Е.Б. Хоботова, професор, д.хім.н., ХНАДУ, Л.Д. Міщенко, ст. наук. співр., к.т.н., Турбоатом**

***Анотація.** Встановлено зв'язок між структурним станом жароміцного нікелевого сплаву і механічними властивостями. Визначено вимоги до структури сплаву.*

***Ключові слова:** нікелевий сплав,  $\gamma'$ -фаза, карбідів, пластичність, ударна в'язкість, довготривала міцність.*

## ESTIMATION OF METAL QUALITY OF GAS TURBINE BLADES ACCORDING TO MICROSTRUCTURE

**I. Gladky, Professor, Candidate of Technical Science, V. Tarabanova, Associate Professor, Candidate of Technical Science, E. Khobotova, Doctor of Chemical Science, Professor, KhNAHU, L. Mischenko, senior researcher, Candidate of Technical Science, Turboatom**

***Abstract.** The relation between the mechanical properties and structural state of the nickel superalloy is determined. The requirements concerning alloy structure are determined.*

***Key words:** nuclear alloy,  $\gamma'$ -phase, carbides, ductility, impact strength, long-term strength.*

### Введение

Наиболее напряженным и ответственным узлом газовых турбин является лопаточный аппарат. Наличие материалов, обладающих комплексом необходимых свойств, в значительной мере определяет уровень развития газотурбостроения.

В настоящее время эксплуатация газовых турбин с рабочей температурой газа 650–850 °С предъявляет повышенные требования к лопаткам турбин. Для направляющих лопаток

стационарных газовых турбин используются высоколегированные никелевые сплавы.

Формирование структуры отливок реагирует на небольшие отклонения от технологического процесса, поэтому в промышленных жаропрочных сплавах возможен широкий спектр структур.

В процессе работы лопатки подвергаются воздействию динамических нагрузок, поэтому к материалу лопаток предъявляются требования не только достаточной прочности, но и достаточной пластичности и ударной вязкости.

### Анализ публикаций

Наиболее широко в настоящее время используются для лопаток турбин никелевые сплавы, представляющие собой матрицу с ГЦК решеткой, карбиды и интерметаллидную  $\gamma'$ -фазу. Сплавы упрочняются, главным образом, Al, Ti, которые, взаимодействуя с Ni, образуют  $\gamma'$ -фазу с ГЦК решеткой. Упрочнение также достигается за счет легирования матрицы элементами, образующими твердые растворы, причем наибольший эффект оказывают Mo, W и Cr. Такие элементы как Cr, Mo образуют карбиды, упрочняющие границы зерен [1].

Выделение соединений типа  $A_3B$  ( $\gamma'$ -фазы) с ГЦК решеткой в аустенитных жаропрочных сплавах представляет собой одно из наиболее благоприятных явлений. По химическому составу она приближается к соединению  $Ni_3(Ti, Al)$ . Следует отметить, что такие соединения образуются только в матрице с высоким содержанием Ni.

Совместимость ГЦК матрицы, имеющей аустенитную структуру, и интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы создает предпосылки для гомогенного зарождения выделений с низкой поверхностной энергией, стабильных в течение длительного времени [1].

Фаза  $\gamma'$  – уникальная интерметаллидная фаза. При взаимодействии с дислокациями она вносит существенный вклад в упрочнение. Кроме того, наследственная пластичность  $\gamma'$ -фазы препятствует сильному охрупчиванию, в отличие от упрочнения фазами, обладающими более высокой твердостью, например, карбидами. Также ее действие прямо противоположно сильному охрупчиванию при образовании хрупкой  $\sigma$ -фазы [2].

### Цель работы

Исходя из геометрии полых лопаток, можно сказать, что исследование микроструктуры в участках входной и выходной кромки позволяет получить информацию о качестве металла и дать ориентировочное заключение о комплексе свойств.

Задачей настоящей работы было исследование структуры жаропрочных сплавов, установление ее взаимосвязи с комплексом механических свойств, разработка требований к структуре жаропрочных сплавов с целью обеспечения высокой надежности и долговечности лопаток газовых турбин.

### Материал и методика исследования

Материалом исследования были лопатки, выполненные из никелевого сплава ЭИ-539 литьем по выплавляемым моделям. Химический состав сплава приведен в табл. 1. Термообработка лопаток состояла в нагреве до температуры 1180 °С, выдержке 4 часа, охлаждении с печью до 900 °С с последующим охлаждением на воздухе. После этого следовало старение при 850 °С с выдержкой в течение 24 часов и охлаждением на воздухе.

Проводились испытания механических свойств. Микроструктура сплава изучалась с помощью оптического и электронного микроскопов, травление шлифов проводилось реактивом следующего состава: HCl – 50 мл; FeCl<sub>3</sub> – 4 г; CuCl<sub>2</sub> – 3,5 г, спирт – 50 мл.

Для получения данных о процентном содержании структурных составляющих был использован метод количественной металлографии.

### Результаты исследования и их обсуждение

Как следует из микроструктурных исследований, структура никелевого сплава состоит из матрицы ( $\gamma$  – твердый раствор), первичных карбидов типа MC, вторичных карбидов типа  $M_6C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $\gamma'$ -фазы.

На основе электронно-микроскопических исследований были выявлены размеры и конфигурация  $\gamma'$ -фазы двух типов: первичная, образующаяся в процессе охлаждения от 1180 °С (размер частиц 0,5–0,9 мкм), и вторичная, выделяющаяся в процессе старения при 850 °С (размер 0,05–0,1 мкм).

Таблица 1 Химический состав никелевого сплава ЭИ-539

| Содержание элементов, % |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Ni                      | C    | Si   | Mn   | Fe   | Ti   | Al   | Cr   | Mo   | Nb   | W    | S     | P     |
| основа                  | 0,11 | 0,15 | 0,12 | 0,26 | 2,23 | 3,60 | 16,0 | 2,78 | 1,70 | 3,66 | 0,008 | 0,016 |

Было выявлено, что частицы первичной  $\gamma'$ -фазы имеют сферическую, игольчатую и кубическую форму, а частицы вторичной  $\gamma'$ -фазы – сферическую и игольчатую.

На основе сопоставления размеров  $\gamma'$ -фазы со значениями пластичности и ударной вязкости построены гистограммы (рис. 1, 2).

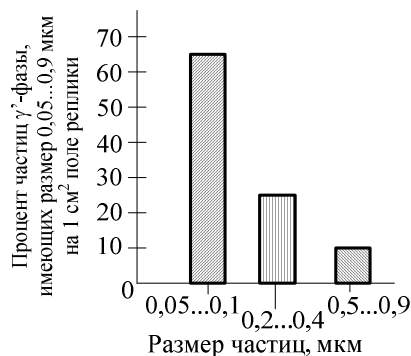


Рис. 1. Гистограммы распределения  $\gamma'$ -фазы в металле с пластичностью  $\delta = 6,5\%$  и ударной вязкостью  $22 \text{ Дж/см}^2$

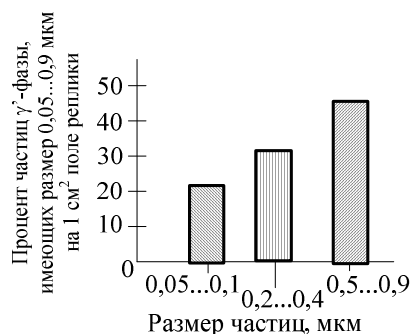


Рис. 2. Гистограммы распределения  $\gamma'$ -фазы в металле с пластичностью  $\delta = 4\%$  и ударной вязкостью  $3,5 \text{ Дж/см}^2$

Таким образом, измельчение частиц  $\gamma'$ -фазы приводит к повышению пластичности ударной вязкости.

Другим структурным фактором, влияющим на свойства сплава, является состояние границ зерен и субзерен.

Как известно, в жаропрочных сплавах границы зерен являются местом начала разрушения, поэтому им уделяется большое внимание.

Границы зерен служат физическим препятствием для распространения скольжения в объеме металла, поэтому очень важно, чтобы эстафетная передача скольжения дислокациями могла быть реализована. В этой связи граница зерен хотя бы частично должна быть прони-

цаема для дислокаций, т.е. выделения по границам зерен не должны быть сплошными.

Поэтому характеру расположения выделений (в первую очередь карбидов) уделяется большее внимание. Было установлено, что сплошные выделения карбидов по границам зерен отрицательно сказываются на уровне механических свойств и прежде всего на ударной вязкости, приводят к ее снижению на 25 %.

Ниже приведен характер расположения карбидов в структуре, которую можно считать недопустимой (рис. 3).

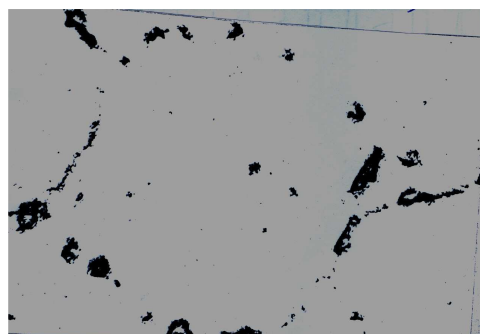


Рис. 3. Характер расположения карбидов, способствующих существенному снижению механических свойств;  $\times 200$

Следует считать, что выделения карбидов должны носить прерывистый характер. Следующим браковочным признаком по микроструктуре является полосчатость в расположении карбидов, которая отрицательно сказывается на свойствах, приводя к существенной анизотропии свойств.

На свойства влияет также однородность структуры, которая для никелевого сплава ЭИ-539 определяется плотностью  $\gamma'$ -фазы. С этой точки зрения структура, представляющая собой соседствующие друг с другом зерна с резко отличающейся плотностью  $\gamma'$ -фазы, является нежелательной, поскольку в этом случае создается предпосылка для возникновения микрогальванических пар, понижающих коррозионную и эрозийную стойкость сплава [1] (рис. 4).

Комплекс механических свойств, а именно, в первую очередь, пластичность и ударная вязкость, а также показатели прочности существенно зависят от разнотекстности. В современных литых сплавах контроль размера зерна очень важен: следует сохранить равновесие между излишне мелкими зернами, вызывающими уменьшение сопротивления

ползучести и длительной прочности, и крупными зернами, влияющими на  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0.2}$ .

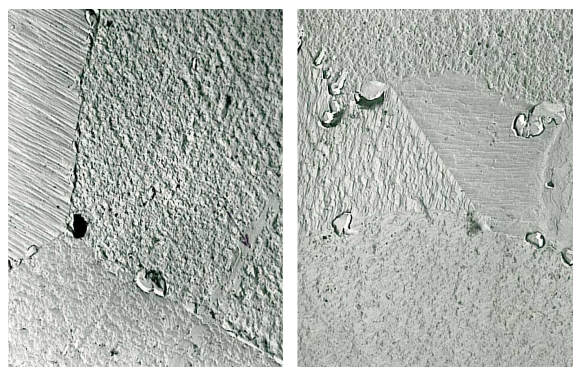


Рис. 4. Электромикроскопические фотографии структуры сплава с резко различающейся плотностью  $\gamma'$ -фазы  $\times 10000$

Проведенные исследования показали влияние разнотерности на ударную вязкость. Коэффициент разнотерности определяли как отношение максимального диаметра зерна ( $D_{max}$ ) к среднему размеру зерна ( $D_{cp}$ ) (рис. 5).

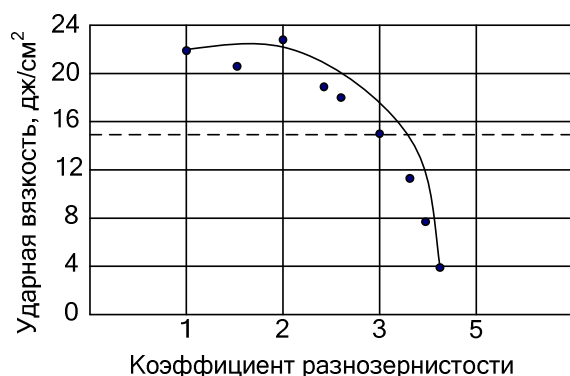


Рис. 5. Взаимосвязь между ударной вязкостью и разнотерностью. Обозначения: - - - — согласно техническим условиям

Из сопоставлений коэффициента разнотерности и значений ударной вязкости следует, что коэффициент разнотерности не должен превышать 3.

### Выводы

1. Установлена взаимосвязь между механическими свойствами и структурным состоянием жаропрочного сплава. Наиболее чув-

ствительными к структуре являются ударная вязкость и пластичность.

2. Ударная вязкость и пластичность зависят от размеров интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы. Измельчение выделений  $\gamma'$ -фазы приводит к повышению пластичности и ударной вязкости. Более высокие значения пластичности и ударной вязкости соответствуют наличию в структуре, главным образом, вторичной  $\gamma'$ -фазы.

3. Браковочным признаком по микроструктуре являются сплошные выделения карбидов по границам зерен и полосчатость в расположении карбидов.

4. Наличие в структуре соседствующих друг с другом участков с разной плоскостью  $\gamma'$ -фазы является нежелательным явлением, поскольку создается предпосылка для возникновения микрогальванических пар, понижающих коррозионную и эрозионную стойкость.

5. Следует сохранить равновесие между излишне мелкими зернами, вызывающими уменьшение сопротивления ползучести и длительной прочности, и крупными зернами, снижающими  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$ , показатели пластичности и ударной вязкости. Коэффициент разнотерности не должен превышать 3.

### Литература

1. Захаров М.В. Жаропрочные сплавы / М.В. Захаров, А.М. Захаров. — М. : Металлургия, 2004. — 386 с.
2. Симс Ч. Жаропрочные сплавы / Ч. Симс, В. Хагель. — М. : Металлургия, 1998. — 576 с.

Рецензент: Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2011 г.