УДК 669.018.45

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМОВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

## © 2013 А.А. Мельников

# Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

#### Поступила в редакцию 02.12.2013

Целью данной работы было исследование влияния термообработки направленной на восстановление дефектов микроструктуры образовавшихся в лопатках в процессе работы. Исследовалась морфология упрочняющей фазы, а также выделений карбидов, как на границах, так и в центре зерен. Изучение микроструктуры проводилось на электронном растровом сканирующем микроскопе TESCAN Vega SB. Определение состава фаз осуществлялось с помощью энергодисперсионного детектора микрорентгеноспектрального анализа INCAx-act. Исследования показали, что применение териообработки позволяет уменьшить карбидиую неоднородность, устранить грубые выделения интерметаллидных фаз и восстановить размер и равномерное распределение упрочняющей фазы по объему металла. Ключевые слова: жаропрочность, термообработка лопаток турбин, дефекты микроструктуры, упрочняющей фазы, выделений карбидов.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе типа ЖС6 широко применяются в двигателестроении при производстве лопаток турбин. Основные требования к этим сплавам заключаются в стабильности фазового состава и структуры, а также высокой прочности границ зерен [1]. Эти требования во многом определяются размерами и морфологией упрочняющей фазы, а также выделениями карбидов по границам зерен. Принятая на современном этапе технология литья и термообработки позволяет сформировать необходимую микроструктуру и обеспечить гарантированные свойства изделий в течение заданного ресурса работы. Однако, в течение эксплуатации возможны отклонения от рабочих параметров в частности перегрев лопаток, который вызывает изменение микроструктуры и снижение жаропрочности. Восстановление структуры за счет дополнительной термообработки могло бы привести к продлению срока службы изделий.

Целью данной работы было исследование влияния термообработки направленной на восстановление дефектов микроструктуры образовавшихся в лопатках в процессе работы. Исследовалась морфология упрочняющей фазы, а также выделений карбидов, как на границах, так и в центре зерен.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования после отработки ресурса были отобраны лопатки 1ступени турбины газоперекачивающего компрессора из сплава ЖС6КВИ с признаками перегрева. Анализ микроструктуры проводился на образцах, вырезанных из замка, а также из пера лопатки входной и выходной кромки. Исследованиям подвергались лопатки в исходном состоянии после наработки, а также после восстановительной термообработки. Изучение микроструктуры проводилось на электронном растровом сканирующем микроскопе TESCAN Vega SB. Определение состава фаз осуществлялось с помощью энергодисперсионного детектора микрорентгеноспектрального анализа INCAx-act.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование микроструктуры пера лопатки после наработки показали на ее заметную неоднородность. При исследовании поверхности шлифа входной кромки во вторичных электронах и рентгеновских лучах установлено выделение карбоборидной эвтектики Эти выделения обогащены вольфрамом, молибденом и титаном (рис. 1а). Выделения карбидов наблюдаются и по границам зерен (рис.16).

Одновременно с этим в структуре наблюдаются грубые выделения фазы Ni<sub>3</sub>(Al,Ti)

Упрочняющая фаза на входной кромке пера лопатки распределена равномерно, имеет равноосный вид, но выделения довольно крупные от

Мельников Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения. E-mail: melnickov.alex@yandex.ru







SEM HV: 30.00 kV
Date(m/dy): 11/07/13
VEX
<t



**Рис. 2.** Упрочняющая фаза в образцах после наработки (x10000): а – входная кромка; б – выходная кромка; в – замок

894



1,3 до 2,2 мкм (рис.2а). Вблизи выделений карбидов по границам зерен ее количественно меньше и сами выделения заметно мельче.

Микроструктура выходной кромки также характеризуется заметной неоднородностью. Наблюдаются выделения карбидов по границам зерен и пластинчатые выделения карбидов внутри зерен, которых не было в микроструктуре входной кромки. Кроме того наблюдаются крупные выделения интерметаллидов внутри зерен.

Выделения упрочняющей фазы распределены по площади образца неравномерно. Размер частиц очень крупный от 1,3 до 2,3 мкм. Наблюдается коагуляция фазы и ее вторичные выделения (рис.26).

Микроструктура замка также характеризуется крупными выделениями интерметаллидов внутри зерен и заметной неоднородностью. Наблюдаются выделения карбидов по границам зерен, а также пластинчатые выделения карбидов внутри зерен (рис.1в).

Включения упрочняющей фазы в замке распределены равномерно без заметной коагуляции, однако размер частиц довольно большой от 0,8 до 0,9 мкм (рис.1в).

Таким образом, длительная работа при рабочих температурах, а также при перегреве вызывает в основном рост размеров выделений упрочняющей фазы, а также ее коагуляцию.

Восстановительная термообработка проводилась в вакууме по режиму - нагрев до 1000°С со скоростью 8 град./мин., с выдержкой при 1050°С в течение 50 мин. Затем нагрев до 1235°С в течение 40 мин и выдержка при этой температуре 1 час 15 мин. Охлаждение до 1000°С проводилось в течение 2,5-5 мин напусканием аргона, и далее в камере до 200°С.

Анализ изменения микроструктуры пера лопатки после восстановительной термообработки показал на уменьшение количества выделений карбоборидной эвтектики (рис.За). В структуре наблюдаются крупные включения карбидов титана (рис.Зб). Термообработка вызывает перераспределение карбидов и их преимущественное выделение на границах зерен. Одновременно с этим появляется большое количество вторичных выделений пластинчатых карбидов в центре зерен.

Микроструктура замка характеризуется заметной карбидной неоднородностью, которую не удалось устранить дополнительной термообработкой (рис.3в). Выделений карбоборидной эвтектики не наблюдается. Включения карбидов очень крупные неравномерно распределены по объему металла.

Включения упрочняющей фазы во всех образцах распределены равномерно (рис.4). Размер частиц составляет 0,45 0,6 мкм. Структура выходной кромки образца аналогична структуре входной кромки. Форма включений упрочняющей фазы кубическая. Размер частиц 0,4- 0,8 мкм.

Выделения упрочняющей фазы в замке мелкие кубической формы, равномерно распределены по объему металла (рис.4в). Размер частиц 0,4-0,7 мкм.

Таким образом, исследования показали, что применение восстановительной термообработки позволяет уменьшить карбидную неоднородность, устранить грубые выделения интерметаллидных фаз и восстановить размер и равномерное распределение упрочняющей фазы по объему металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Шпунт К.Я., Сидоров В.В. Высокожаропрочный литейный сплав на никелевой основе марки ЖС6Ф // Сб. «Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники». М.: Наука, 1977.

# STUDY OF THE IN FLUENCE OF REHABILITATION TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE OF THERMAL VACUUM TURBINE BLADES MADE OF NICKEL-BASED ALLOY

#### © 2013 A.A. Melnikov

## Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University)

The aim of this work was to study the effect of heat treatment to restore defects of microstructure formed in the blades during operation. Strengthening phase morphology was studied, as well as allocations of carbides, both on the borders and in the center of the grains. Study on the microstructure of electronic raster scanning microscope TESCAN Vega SB. the composition of the phases was carried out using detector INCAx-act analysis. Studies have shown that the use of heat treatment to reduce carbides heterogeneity, eliminate the gross allocation of phases and restore size and uniform distribution of the reinforcing phase in terms of metal Keywords: high temperature turbine blades, heat treatment, hardening phase microstructures, defects, selections of carbides.

Alexey Melnikov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Technology of Metals and Aviation Materials Department. E-mail: melnickov.alex@yandex.ru