

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ6 И ВТ9 ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

А.Г. Пайкин¹⁾, А.Д. Теряев¹⁾, В.А. Шулов¹⁾, А.В. Крайников¹⁾, В.И. Энгелько²⁾, К.И. Ткаченко²⁾,
Г.А. Вязьменова²⁾

¹⁾ ММП имени В.В. Чернышева, 123362 Москва, А-80, ГСП-7, Вишневая ул. 7, Россия,
Тел.: (495) 4914988, Факс: (495)4915652, E-mail: shulovva@mail.ru

²⁾ НИИ электро-физической аппаратуры имени Д.В. Ефремова, 189631, Санкт-Петербург,
Металлострой, дорога на Металлострой 1, Россия;
Тел.: (812) 4627845, Факс: (812)4639812, E-mail: engelko@niiefa.spb.ru

Проанализированы экспериментальные данные о влиянии режимов облучения сильноточными импульсными электронными пучками (СИЭП) на физико-химическое состояние поверхностных слоев лопаток ГТД из жаропрочных $\alpha+\beta$ -титановых сплавов (ВТ6 и ВТ9). Основное внимание сконцентрировано на результатах структурных исследований проведенных методом ПЭМ.

Введение

В работах [1,2] экспериментально было показано, что с помощью облучения сильноточным импульсным электронным пучком (СИЭП) микросекундной длительности удается модифицировать ~20-микронные поверхностные слои лопаток из жаропрочных $\alpha+\beta$ -титановых сплавов. Установлено, что при облучении в поверхностных слоях лопаток из $\alpha+\beta$ -титановых сплавов, в зависимости от величины плотности энергии в импульсе, протекают процессы: плавления, перераспределения элементов, кратерообразования, изменения фазового состава и дислокационной структуры, абляции, высокоскоростной кристаллизации из расплава, изменения микроструктуры (от игольчатой до глобулярной), формирования остаточных растягивающих или сжимающих напряжений и др.

Кроме того, в [1,2] изучалось влияние режимов электронно-лучевой и финишной термической или термомеханической обработок на эксплуатационные свойства лопаток из $\alpha+\beta$ -титановых сплавов ВТ6 и ВТ9, в результате чего было установлено, что, используя облучение СИЭП в ускорителе «Геза-1» при энергии электронов 115-120 кэВ, плотности энергии 18-20 Дж/см² и числе импульсов более 2 удается повысить следующие характеристики лопаток: предел выносливости - от 10 до 40 %; эрозионную стойкость - более чем в 2 раза, жаростойкость - более чем в 3 раза; сопротивление горячей солевой коррозии - более чем в 4 раза. В то же время исследований субструктуры, формируемой в поверхностных слоях на стадии облучения, до сих пор реализовано не было, что не позволяет дать однозначного ответа вопрос о причинах различного поведения обработанных СИЭП лопаток из сплавов ВТ6 и ВТ9 при проведении усталостных испытаний (облученные при адекватных условиях лопатки из сплава ВТ6 характеризовались повышением предела выносливости σ_{-1} на 20% непосредственно после обработки СИЭП и на 40% после финишной термообработки при 520-560 °С в вакууме 10⁻⁶ мм. рт. ст. в течение 2 часов, а лопатки из сплава ВТ9 - резким снижением величины σ_{-1} на 80 % после облучения и только в ре-

зультате финишной термомеханической обработки при 520-560 °С и нагрузке 160-180 МПа удалось повысить предел усталости на 20%).

В этой связи целью настоящей работы являлось исследование методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновского микроанализа химического состава и микроструктуры в поверхностных слоях лопаток из сплавов ВТ6 и ВТ9, подвергнутых обработке СИЭП.

Материалы, оборудование и методики исследования

В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались серийные лопатки вентилятора и компрессора ГТР РД33, изготавливаемые на ММП имени В.В. Чернышева из сплавов ВТ6 и ВТ9. Состояние материала в поверхностных слоях лопаток исследовалось методами: рентгеновского микроанализа (РМА), просвечивающей электронной микроскопии и оптической металлографии. Обработка мишеней СИЭП [1,2] была реализована в ускорителе «Геза-1» при следующих режимах: энергия электронов - 120 кэВ; длительность импульса - 30 мкс; плотность энергии в пучке - 18-20 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка - 80 см²; неоднородность плотности по сечению пучка - менее 10 %. После облучения из лопаток вырезались образцы размером 15x10 мм², из которых механическим, электрохимическим и химическим методами приготавливались тонкие фольги для определения микроструктуры в объемных слоях и в перекристаллизованном слое на глубине 10-15 мкм с помощью ПЭМ.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 1-3 и в таблице 1.

Результаты исследования методом ПЭМ свидетельствуют о том, что исходная микроструктура сплавов ВТ9 и ВТ6 является глобулярно-пластинчатой, двухфазной, с удлиненными субзернами α -фазы размером 1-5 мкм (светлые области). По границам субзерен располагаются темные про-



а

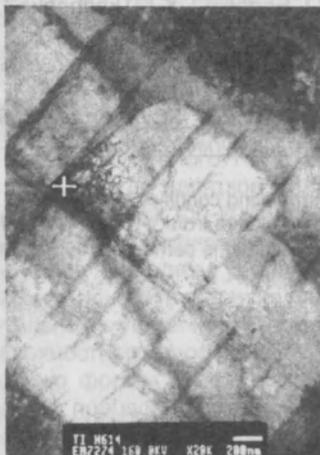


б

Рис. 1. ПЭМ изображение микроструктур в серийных лопатках из сплавов ВТ6 (а) и ВТ9(б).

слойки β -фазы (оторочка) или превращенной β -фазы (темные полосчатые области) являющейся по сути дела пересыщенной мартенситной α' -фазой. После облучения лопаток из сплава ВТ9 микро-структура в поверхностном слое выглядит как полностью мартенситная с α' - и α'' -пластинами, имеющими различную ориентировку.

После обработки лопаток из сплава ВТ9 СИЭП микро-структура в поверхностном слое выглядит как полностью мартенситная с α' - и α'' -пластинами, имеющими различную кристаллографическую ориентировку. Эти пластины толщиной до 200 нм, имеющие игольчатую форму, можно



а



б

Рис. 2. ПЭМ изображение микроструктур на глубине 10-15 мкм в облученных лопатках из сплава ВТ6: (а) - α' - или α'' -пластины в пределах α -колони; (б) - структурные элементы с развитой дислокационной структурой.



Рис. 3. ПЭМ изображение микроструктуры на глубине 10-15 мкм в облученных лопатках из сплава ВТ9 (отмечена точка РМА).

Таблица 1. Элементный состав на глубине 10-15 мкм по данным РМА (масс. %) в различных характерных макрочточках материала лопаток после обработки СИЭП.

сплав	точка анализа	Al	Mo	V
ВТ6	α' -или α'' -пластины	6.1	-	2.7
	оторочка α' -или α'' -пластин	6.1	-	3.9
	α -или α'' -пластины	7.5	4.0	-
ВТ9	оторочка α' -или α'' -пластин	6.8	9.5	-
	глобулярное выделение	10.4	1.1	-

наблюдать как в продольном, так и в поперечном сечениях лопатки. По сравнению с α -пластинами, которые присутствуют в поверхностных слоях серийных лопаток из сплава ВТ9, мартенситные пластины имеют игольчатую форму и характеризуются значительно меньшими размерами, наличием первичных и вторичных двойников и повышенной плотностью дислокаций. Кроме того, в окрестности сформированных при высокоскоростной перекристаллизации α' - и α'' -пластин при-

сутствуют мелкодисперсные выделения обогащенные алюминием и молибденом (табл. 1). Образование такого рода конгломератов не наблюдается в лопатках из сплава ВТ6.

Процесс высокоскоростной направленной кристаллизации начинается протекать в поверхностном слое лопаток непосредственно после прекращения действия импульса при реализации облучения в режиме «плавления» [1,2]. Поскольку в данном случае затравками при кристаллизации являются края структурных элементов сплава (пластин или глобул), направления их роста будут определяться ориентацией этих элементов и направлением тепловода. В этой связи при дендритном росте кристаллитов они взаимодействуют друг с другом, направления их роста пересекаются и ориентация формируемых α -пластин может не совпадать с нормалью к поверхности, что и наблюдается на практике [1,2]. В условиях высокоскоростной и высокоградиентной кристаллизации титановых сплавов имеют место условия для протекания ликвации в поверхностном слое.

Наиболее благоприятны условия для реализации ликвации в поверхностных слоях лопаток из сплава ВТ9, что обусловлено высокими значениями коэффициента стабилизации β -фазы для сплава ВТ9 - $K_\beta=0,45$ ($K_\beta=0,3$ для сплава ВТ6) и коэффициента распределения молибдена ($K_0=1,83$ - Мо, $K_0=0,80$ - V). Кроме того, ванадий имеет более высокие коэффициент диффузии в титане и растворимость в α -фазе (до 3,5 масс.%), чем молибден (до 2 масс. %). Высокая дисперсность конгломератов β -фазы связана с тем, что продолжительность обработки материала поверхностного слоя в β и $\alpha+\beta$ областях не превышает нескольких сотен микросекунд (10^{-6} - 10^{-4} с, рис. 4). За это время рост сформированных зародышей β -фазы в условиях высокого градиента температур приводит к образованию тонкодисперсных пластин (игольчатый тип микроструктуры).

Поэтому структурные неоднородности после завершения кристаллизации в поверхностных

слоях деталей из сплава ВТ6, в отличие от мишеней из сплава ВТ9, могут быть легко устранены с помощью финишной термообработки в вакууме. Для деталей же из сплава ВТ9 необходимо проводить термомеханическую обработку [1,2].

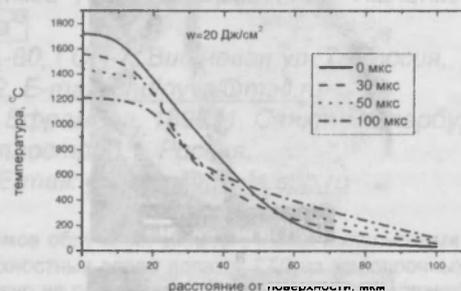


Рис. 4. Температурные профили в поверхностном слое облученных мишеней из сплава ВТ6 после завершения действия импульса.

Заключение

Методом просвечивающей электронной микроскопии показано, что облучение СИЭП в режиме плавления приводит к формированию в поверхностном слое толщиной 20-25 мкм тонкодисперсной пластинчатой (игольчатой) микроструктуры. При этом, в отличие от лопаток из сплава ВТ6, в модифицированном поверхностном слое лопаток из сплава ВТ9 отмечено присутствие глобулярных выделений размером 10-100 нм с повышенной концентрацией алюминия или молибдена.

Работа поддержана РФФИ (проект №05-08-01498а).

Список литературы

1. Пайкин А.Г., Белов А.Б., Энгелько В.И. и др. // Физика и химия обработки материалов. - 2005. - №2. - с. 32-41.
2. Пайкин А.Г., Белов А.Б., Энгелько В.И. и др. Упрочняющие технологии и покрытия - 2005. - №11. - с. 9-18.

STRUCTURAL CHANGES INTO SURFACE LAYERS OF PARTS FROM TITANIUM ALLOYS IRRADIATED WITH PULSED ELECTRON BEAMS

A.G. Paikin¹), A.D. Teryaev¹), V.A. Shulov¹), A.V. Krainikov¹), V.I. Engelko²), K.I. Tkachenko²),
G. E. Vyazmenova²)

¹) *Chernyshev Machine Building Enterprise, 7 Vishnevaya Street, A-80, GSP-3, Moscow 123362, Russia, Tel.: (495) 4914988, Fax: (495) 4915652, E-mail: shulovva@mail.ru*

²) *Efremov Institute of Electro-physical Apparatus, 1 Sovietyky Avenue, Metallostroy, St. Peterburg 189631, Russia; Tel.: (812) 4627845, Fax: (812)4639812, E-mail: engelko@niiefa.spb.ru*

The present paper reviews the experimental results dedicated to the effect of irradiating conditions with intense pulsed electron beams on physical and chemical state of the surface layer of gas turbine engine blades from VT6 and VT9 refractory $\alpha+\beta$ -titanium alloys. The main attention was concentrated in the results of structural investigations carried out by transmission electron microscopy.