

ТЕКСТУРООБРАЗОВАНИЕ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МИШЕНЕЙ ИЗ СПЛАВА ВТ9 ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Светлой памяти Светланы Ивановны Жуковой посвящается

В.А. Шулов¹⁾, Д.А. Теряев¹⁾, Ю.А. Перлович²⁾, М.Г. Исаенкова²⁾, В.А. Фесенко²⁾, О.А. Быценко¹⁾,
В.И. Энгелько³⁾, К.И. Ткаченко³⁾

¹⁾Московский авиационный институт (государственный технический университет),
125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе 4, Россия;
тел.: (7-499) 1584424, факс: (7-499) 1582977, e-mail: shulovva@mail.ru

²⁾Московский инженерно-физический институт, 1115409 Москва, Каширское шоссе 31,
Россия, тел.: (495) 3249210, факс: (495) 3243165, e-mail: perlovich@mail.ru

³⁾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 предварительной механической обработки на физико-химическое состояние поверхностных слоев облученных импульсными электронными пучками лопаток ГТД из жаропрочного α - β -титановых сплавов ВТ8 и ВТ9. Установлено, что степень предварительного пластического деформирования оказывает определяющее влияние на толщину перекристаллизованного слоя, формируемого при облучении мишеней сильноточными импульсными электронными пучками.

Введение

В [1] изучалось влияние режимов электронно-лучевой и финишной термической или термомеханической обработок на эксплуатационные свойства лопаток из α - β -титановых сплавов ВТ6 и ВТ9, в результате чего было установлено, что, используя облучение СИЭП в ускорителе «Геза-1» [2] 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 [1].

В работе [3] рассматривался 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 результате финишной термомеханической обработки при 520-560 °С и нагрузке 160-180 МПа удавалось повысить предел усталости на 20%). Методом просвечивающей электронной микроскопии было 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 отмече-

но присутствие глобулярных выделений размером 10-100 нм с повышенной концентрацией алюминия или молибдена. Последнее может привести к снижению предела выносливости. Еще одной причиной этого может быть текстурообразование в поверхностном слое при облучении СИЭП.

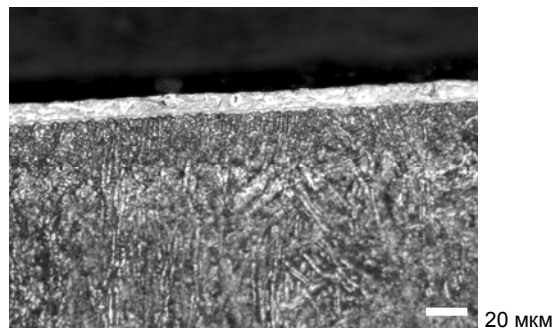


Рис. 1. Микроструктура в поверхностном слое лопаток из сплава ВТ9, подвергнутых обработке СИЭП пятью импульсами при энергии электронов - 120 кэВ, длительности импульса - 30 мкс и плотности энергии в пучке - 18-20 Дж/см².

В этой связи целью настоящей работы являлось исследование текстуры, формируемой в перекристаллизованном материале поверхностного слоя деталей из сплава ВТ9 при их облучении СИЭП в режиме плавления.

Материалы, оборудование и методики исследования

В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались образцы диаметром 24 мм и толщиной 5 мм из сплава ВТ9 [3], изго-

товленные по серийной технологии производства лопаток компрессора ГТД РД33, применяемым на ММП имени В.В. Чернышева. Состояние материала в поверхностных слоях лопаток исследовалось методами: рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии и оптической металлографии. Обработка мишеней СИЭП [2] была реализована в ускорителе "Геза-1" в режиме плавления: 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 %.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 2-6.

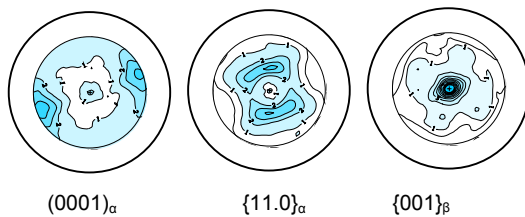


Рис. 2. Прямые полюсные фигуры (0001) и {11.0} α-фазы необлученного образца из сплава BT9.

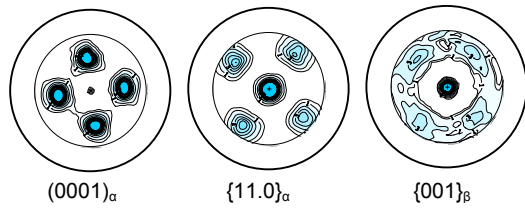


Рис. 3. Прямые полюсные фигуры (0001) и {11.0} α-фазы, зарегистрированные с поверхности образца из сплава BT9 после облучения СИЭП при 18-20 Дж/см² четырьмя импульсами.

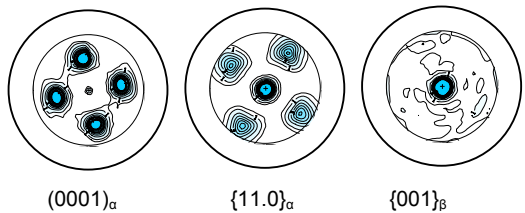


Рис. 4. Прямые полюсные фигуры (0001) и {11.0} α-фазы, зарегистрированные на глубине 10 мкм от поверхности образца из сплава BT9 после облучения СИЭП при 18-20 Дж/см² четырьмя импульсами.

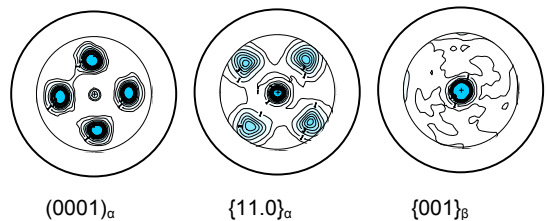


Рис. 5. Прямые полюсные фигуры (0001) и {11.0} α-фазы, зарегистрированные на глубине 20 мкм от поверхности образца из сплава BT9 после облучения СИЭП при 18-20 Дж/см² четырьмя импульсами.

Рентгеновское исследование образцов заключалось в изучении кристаллографической текстуры по методу прямых полюсных фигур [4]. Текстура позволяет восстановить предысторию исследуемых образцов, повторяя симметрию использованной деформационной схемы. У каждого типа кристаллической решетки, в зависимости от действующих в ней механизмов деформации, существуют ориентации зерен, устойчивые по отношению к сжатию, растяжению и их комбинации, и именно эти ориентации отвечают основным компонентам текстуры изделий. В рассматриваемом случае модификации пучком электронов кристаллизация расплавленного слоя будет протекать с образованием разных текстур в случаях, когда она проходит независимо от подложки или с повторением ориентации ее зерен; текстура слоя, претерпевшего нагрев до температур β-области с последующей закалкой, будет обнаруживать большее или меньшее рассеяние по сравнению с исходной в зависимости от того, будут ли реализовываться все варианты ориентационного соотношения между β- и α-фазами при α→β→α превращениях, ведущих к размножению исходных ориентаций. Отклонение наблюдаемых текстур от прогнозируемых указывает на существование эффектов, не учитываемых при априорном анализе ситуации. В отношении текстуры исходных прутков остается вопрос, касающийся преобладания в текстуре растяжения остаточной β-фазы компоненты <001>, наблюдаемой на полюсных фигурах необлученных образцов, а также на обратной стороне облученных образцов. В этой связи можно сослаться на появление оси <001> в качестве направления растяжения или прокатки в некоторых сплавах с ОЦК-решеткой, особенно – при повышенных температурах деформации. Сопреженное с облучением сжатие объясняет формирование в образцах текстуры, резко отличающейся от исходной. В β-фазе вдоль нормали к оси таблетки, совпадавшей в исходном прутке с направлением растяжения, под облучением устанавливаются оси <001>_β и <111>_β, устойчивые в ОЦК-решетке по отношению к деформации сжатием. Соответственно, в текстурах сжатия для сплавов с ОЦК-решеткой главными являются компоненты, в зернах которых перпендикулярно оси сжатия располагаются плоскости {001} и {111}. После β→α фазового превращения при соблюдении указанного выше ориентационного соотношения в зернах образовавшейся α-фазы альтернативно реализуются две возможности: (1) базисные плоскости (0001) отстоят от плоскости поверхности на 45° (и на 90°), (2) плоскости {11.0} параллельны плоскости поверхности или отстоят от нее на 60°. (Эти ориентировки устанавливаются при анализе построенных полюсных фигур с помощью стандартных стереографических проекций).

Однако, если текстура растяжения исходного прутка в первом приближении была аксиальной, формирующаяся вместо нее текстура сжатия таковой не является, что особенно резко выражено у образцов из сплава BT9. По-видимому, это связано с особенностями переориентации зерен в

условиях осевой деформации. Чтобы из аксиальной текстуры растяжения сформировалась аксиальная текстура сжатия, все зерна должны деформироваться и переориентироваться взаимно независимо. Между тем, первоначальная активизация скольжения лишь в каких-то зернах придает начавшейся деформации асимметричный характер и превращает ее из аксиальной в двухосную. В результате, переориентация зерен, начавших деформироваться позднее первых, каким-то образом адаптируется к их переориентации, так что вместо кольца на полюсных фигурах $\{011\}_\beta$ или производной $(0001)_\alpha$ мы получаем 4 изолированных максимума, соответствующих единственной ориентировке β -зерен, симметричной относительно нормали к поверхности таблетки и устойчивой по отношению к сжатию вдоль этой нормали. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследования, облученных мишеней из сплава ВТ9 методом просвечивающей электронной микроскопии, которые представлены на рис. 6.

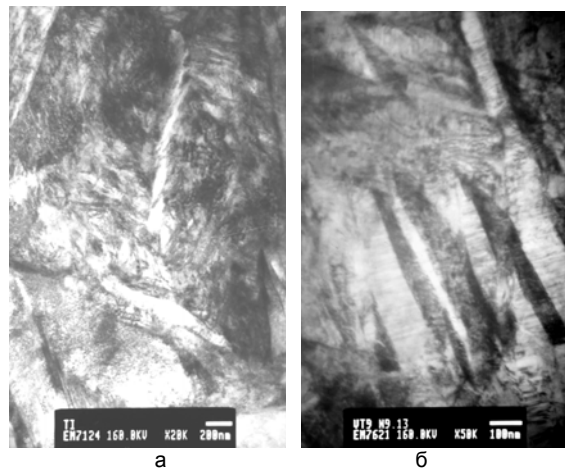


Рис. 6. Микроструктура в поверхностном слое образцов из сплава ВТ9 на глубинах 6 мкм (а) и 15 мкм (б) после облучения СИЭП при 18-20 Дж/см².

Заключение

Методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии показано, что облучение СИЭП в режиме плавления приводит к формированию в поверхностном слое толщиной 20-25 мкм текстуры сжатия и тонкодисперсной пластинчатой (игольчатой) микроструктуры (Рис.7). Все это может привести к резкому падению усталостной прочности при испытаниях на изгиб.

Работа поддержана Минобрнауки РФ.

Список литературы

1. Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А. и др. // ж. Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2003. – 3. – С. 41-49.
2. Engelko V, Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. // J. Vacuum. – 2001. – 62. – Р. 211-214.
3. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А. и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 3. – 2010. – С. 37-40.
4. Русаков А. А. Рентгенография металлов. - М.: Атомиздат. - 1977. - 480 с.

CREATION OF TEXTURE INTO SURFACE LAYERS OF TARGETS FROM VT9 TITANIUM ALLOY DURING THEIR IRRADIATION WITH INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS

V.A. Shulov¹⁾, D.A. Teryaev¹⁾, Yu.A. Perlovich²⁾, M.G. Isaenkova²⁾, V.A. Fesenko²⁾, O.A. Bytzenko¹⁾, V.I. Engelko³⁾, K.I. Tkachenko³⁾

¹⁾Moscow Aviation Institute, 4 Volokolamskoye shosse, A-80, GSP-3, , Moscow 125993, Russia, Tel.: (499) 1584424, Fax: (499) 1582977, E-mail: shulovva@mail.ru

²⁾Moscow Engineering Physics Institute, 31Kashirskoye shosse, Moscow 115409, Russia, Tel.: (495) 3249210, Fax: (495) 3243163, E-mail: perlovich@mail.ru

³⁾Efremov Institute of Electro-physical Apparatus, 1 Sovietsky Avenue, Metallostroy, St. Petersburg 189631, Russia; Tel.: (812) 4627845, Fax:(812)4639812, E-mail: engelko@niiefa.spb.ru

The present paper reviews the X-ray experimental results dedicated to the texture formation into surface layer of gas turbine engine blades from VT9 refractory $\alpha+\beta$ -titanium alloy as a result of irradiation with intense pulsed electron beams.