

ТЕКСТУРА И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МИШЕНЕЙ ИЗ СПЛАВА VT8 ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

В.А. Шулов¹), О.А. Быценко²), Д.А. Теряев¹), И.Г. Стешенко²),
Ю.А. Перлович³), М.Г. Исаенкова³), В.А. Фесенко³)

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Волоколамское шоссе 4, 125993 Москва, А-80, ГСП-3, Россия, shulovva@mail.ru

²ММП имени В.В. Чернышева,
Вишневая ул. 7, 123362 Москва, А-80, ГСП-7, Россия, teryaev_a@avia500.ru

³Московский инженерно-физический институт,
Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Россия, perlovich@mail.ru

Проанализированы экспериментальные данные о влиянии облучения сильноточными импульсными электронными пучками (СИЭП) на текстурообразование и формирование остаточных напряжений в поверхностных слоях мишеней из титанового сплава VT8. Эти данные имеют большое практическое значение, поскольку лопатки и диски компрессора вертолетных двигателей ВК2500 изготавливаются именно из этого материала. Кроме того, информация о текстурообразовании и об остаточных напряжениях в поверхностных слоях обеспечивает прогнозирование эксплуатационных свойств деталей из этого материала, прежде всего усталостной прочности и жаростойкости. Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для модифицирования поверхности лопаток компрессора из сплава VT8, обеспечивающим проведение высокоскоростной термообработки (закалки), перекристаллизации материала в поверхностных слоях 20-30 мкм, очистку и выглаживание поверхности. В зависимости от плотности энергии в импульсе в поверхностных слоях мишеней из сплава VT8 удается создать как растягивающие, так и сжимающие остаточные напряжения и сформировать как текстуры растяжения, так и сжатия. Сжимающие напряжения формируются при облучении с невысокими плотностями энергии менее 20 Дж/см². Кроме того, при таких режимах облучения на поверхности не происходит образования микродефектов в форме кратеров, т.е. отсутствуют концентраторы напряжений. Вышесказанное оказывает определяющее влияние на эксплуатационные свойства изделий.

Ключевые слова: электронно-пучковая обработка; лопатки компрессора; сканирующая электронная микроскопия; рентгеноструктурный анализ; оптическая металлография; эксплуатационные свойства.

TEXTURE AND RESIDUAL STRESSES IN THE SURFACE LAYERS OF VT8 ALLOY TARGETS DURING IRRADIATION WITH INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS

Vyacheslav Shulov¹), Oksana Bytsenko²), Dmitriy Teryaev¹), Igor Steshenko²),
Yuriy Perlovich³), Margarita Isaenkova³), Vladimir Fesenko³)

¹Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoye shosse, 125993 Moscow, Russia, shulovva@mail.ru

²Chernyshev Machine Building Enterprise,
7 Vishnevaya Street, A-80, GSP-7, 123362 Moscow, Russia, teryaev_a@avia500.ru

³National Research Nuclear University MEPhI, 115409 Moscow, Russia, perlovich@mail.ru

The present paper reviews the experimental results dedicated to the effect of irradiating conditions with intense pulsed electron beams on texture and residual stresses formation in the surface layer of targets from VT8 titanium alloy. These data have a great practical significance because the blades and disks of VK-2500 helicopter engine compressors are produced from this material. Furthermore, the information on texture formation and residual stresses in the surface layer allows to determine service properties (fatigue strength and oxidation resistance in air) of details from this material. It is shown that intense pulsed electron beam of microsecond duration is high effective instrument for modification of compressor and turbine blades from VT8 alloy. It allow to realize high speed heat treatment (hardening), recrystallization of material in the surface layer with thicknesses of 20-30 μm , purification and decrease of roughness of surface. It is possible to form in the surface layer tensile or compressive residual stresses and compressive or tensile textures depending upon value of energy density in a pulse in the surface layer of VT8 targets. Compressive residual stresses are formed during irradiation at low values of energy density in a pulse (lesser 20 J/cm²). Furthermore, at these regimes of irradiation microdefects with form of craters are not formed that is absence of stress concentrates. The above lead to main effect on operation properties of parts.

Keywords: electron beam treatment; compressor blades; scanning electron microscopy; X-rays structural analysis; optical metallography; operating properties.

Введение

Разработка и внедрение новых технологий для повышения долговечности и надежности лопаток компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) яв-

ляется одной из важнейших проблем авиационного двигателестроения [1]. Очень часто компрессорные лопатки, изготавливаемые из жаропрочных сталей и титановых сплавов, являясь наиболее нагружен-

ными компонентами, определяют ресурс и надежность эксплуатации всего изделия. Электронно-лучевая обработка может быть отнесена к наиболее прогрессивным методам модификации поверхности различных деталей [2-4]. Использование широкоапертурных электронных пучков позволяет осуществлять модифицирование химического и фазового состава в тонких поверхностных слоях, а также изменять морфологию поверхности и структуру приповерхностных областей [2-4]. В процессе обработки меняется шероховатость поверхности, происходит оплавление и удаление материала поверхностных слоев за счет испарения, сублимации, абляции и плазмообразования [2-4].

В этой связи целью настоящей публикации являлась разработка технологических основ процессов модифицирования поверхности образцов из сплава ВТ8, из которого изготавливаются лопатки компрессора двигателя ВК2500, причем эта модификация реализуется с применением сильноточного импульсного электронного пучка, формируемого в ускорителе «Геза-ММП»

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались образцы толщиной 4 мм и диаметром 26 мм, вырезанные из прутков, из которых изготавливаются серийные лопатки и диски компрессора из сплава ВТ8 двигателя РД2500. Состояние материала в поверхностных слоях образцов исследовалось методами: рентгеноструктурного анализа (РСА), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и оптической металлографии при послойном удалении материала поверхностного слоя с помощью тонкого ручного полирования и химического травления. Тонкое ручное полирование и химическое травление использовалось также для снятия поверхностных слоев при проведении послойного анализа текстуры. Методом РСА определялись поверхностные остаточные напряжения, что позволяет прогнозировать прочностные свойства мишеней. Обработка мишеней СИЭП [1] была реализована в ускорителе «Геза-ММП» (рис. 1) при следующих режимах: энергия электронов - 120 кэВ; длительность импульса - 30 мкс; плотность энергии в пучке – от 18-20 Дж/см² - 32-36 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка – 80 см²; неоднородность распределения плотности энергии по сечению пучка – менее 10 %. После облучения из мишеней механическим, электрохимическим и химическим методами приготавливались тонкие фольги для определения микроструктуры в объемных слоях и в перекристаллизованном слое на различных глубинах с помощью ПЭМ.

Результаты и их обсуждение

Хорошо известно [1-3], что главным технологическим параметром при проведении процесса облучения СИЭП является плотность энергии (w) в импульсе. С ростом плотности энергии в приповерхностных слоях мишеней из жаропрочных титановых сплавов протекают следующие процессы [1]: испарение органических примесных компонентов, испарение и плавление материала поверхностного слоя, кратерообразование и трещинообразование, плазмообразование и абляция. Эти процессы



Рис. 1. Внешний вид установки «Геза-ММП»

Fig. 1. The appearance of "Gesa-MMP" accelerator

определяют физико-химическое состояние материала в поверхностном слое облучаемых мишеней, что приводит, в конечном счете, к модификации их свойств. Влияние режимов облучения на физико-химическое состояние поверхностных слоев лопаток и образцов из жаропрочных титановых сплавов ВТ6 и ВТ9 проиллюстрировано в работе [4]. Из приведенных в [4] данных можно заключить, что в результате облучения формируются три достаточно четко выраженные зоны: зона кристаллизации из жидкости, зона закалки из β -области и зона закалки из $\alpha+\beta$ -области. В зоне кристаллизации из жидкости протекает образование мелкодисперсной мартенситной структуры с преимущественной ориентацией α -пластин. Значит, возможно формирование текстуры сжатия или растяжения.

Необходимость использования текстурного анализа при изучении образцов, обработанных сильноточным импульсным электронным пучком, обусловлена чрезвычайно высокой чувствительностью текстуры, формирующейся в тех или иных слоях, к особенностям протекания в них процессов структурообразования. 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, прошедших ту или иную технологическую обработку. В рассматриваемом случае поверхностной 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 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ превращениях, ведущих к размножению исходных ориентаций.

Исходные прутки из титановых сплавов были получены прокаткой в β -области, так что при температуре деформации в них должна была сформироваться

роваться текстура изделий с аксиальной симметрией, характерная для металлических материалов с ОЦК-решеткой: с осью растяжения вдоль оси прутка должны совпадать кристаллографические оси $\langle 011 \rangle$. При этом другие оси того же типа располагаются на угловых расстояниях 60° и 90° от оси прутка. Последующее охлаждение прокатанного прутка сопряжено с прохождением $\beta \rightarrow \alpha$ превращения при ориентационном соотношении $\{011\}_\beta \parallel (0001)_\alpha$, $\langle 111 \rangle_\beta \parallel \langle 11.0 \rangle_\alpha$. В результате зерна образующейся α -фазы имеют такие ориентации, при которых их базисные оси $[0001]$ расположены параллельно осям $\langle 011 \rangle$ исходной β -фазы. Если в исходной β -фазе формируется аксиальная текстура, то та же аксиальная текстура будет наследоваться и α -фазой (рис. 2).

В отношении текстуры исходных прутков остается вопрос, касающийся преобладания в текстуре растяжения остаточной β -фазы компоненты $\langle 001 \rangle$, наблюдаемой на полюсных фигурах необлученных образцов, а также на обратной стороне облученных образцов. В этой связи можно сослаться на появление оси $\langle 001 \rangle$ в качестве направления растяжения или прокатки в некоторых сплавах с ОЦК-решеткой, особенно – при повышенных температурах деформации.

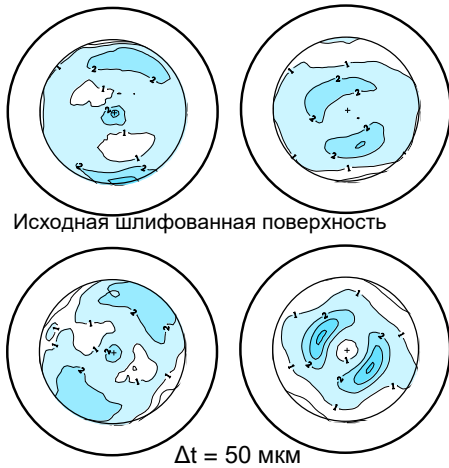


Рис. 2. Прямые полюсные фигуры (ППФ) $\{0001\}$ и $\{110\}$ α -фазы для необлученного образца сплава VT8

Fig. 2. Straight pole figures (SPF) $\{0001\}$ and $\{110\}$ of the α -phase of the nonirradiated VT8 alloy samples

В то же время, однако, высокий уровень бестекстурного фона на этих полюсных фигурах указывает, что при изготовлении прутков существенная роль принадлежала некристаллографическому механизму деформации, состоящему во взаимном проскальзывании зерен по границам и вызывающему беспорядочную переориентацию зерен. Как известно, этот механизм деформации наиболее легко активизируется в условиях фазового превращения при температурах $(\alpha+\beta)$ -области, когда объемные доли фаз взаимно сопоставимы. В процессе прокатки прутка вследствие его постепенного охлаждения такая ситуация вполне вероятна [4, 5].

Наиболее важным непрогнозируемым эффектом электронного облучения представляется резкое изменение текстуры образца при повышении суммарной энергии пучка, по крайней мере, в сло-

ях, близких к облучаемой поверхности, т.е. в слоях с перекристаллизованным материалом (рис. 2-4).

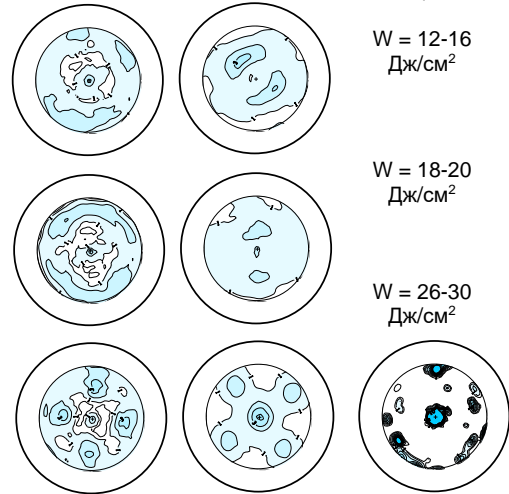


Рис.3. ППФ $\{0001\}$, $\{11.0\}$ α -фазы и ПФ $\{001\}$ β -фазы для поверхностного слоя образцов сплава VT8, подвергнутых облучению электронным пучком по различным режимам.

Fig. 3. SPF $\{0001\}$, $\{11.0\}$ α phase, and SPG $\{001\}$ β phase in the surface layer of the VT8 alloy samples irradiated by electron beam at different regimes

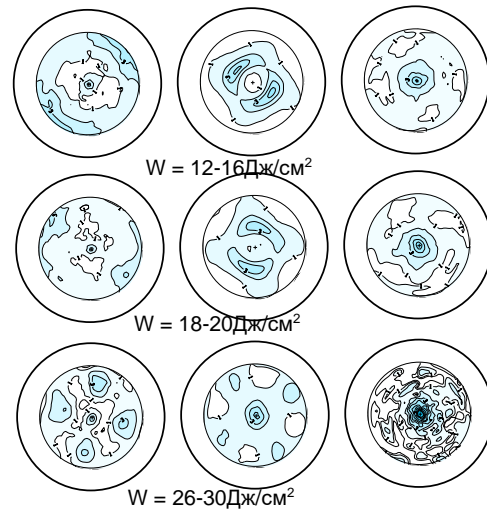


Рис. 4. ППФ $\{0001\}$, $\{11.0\}$ α -фазы и ПФ $\{001\}$ β -фазы для образцов сплава VT8, подвергнутых облучению электронным пучком по различным режимам. Удаленный поверхностный слой 20 мкм.

Fig. 4. SPF $\{0001\}$, $\{11.0\}$ α phase, and SPF $\{001\}$ β phase in the surface layer of the VT8 alloy samples irradiated by electron beam at different regimes. The survey after removal of the surface layer with thickness 10 μm .

Лучше всего этот сдвиг по режимам облучения наблюдается по текстурным полюсным фигурам $\{001\}$ β -фазы, которая по какой-то причине ведет себя рассогласованно с α -фазой.

Регистрация дифрактограмм при выполнении рентгеноструктурного анализа проводилась с поверхности приготовленных и облученных образцов при фокусировке по Бреггу-Брентано. Из этих данных рассчитывались величины остаточных напряжений по смещению рентгеновских линий (рис. 5).

Кроме того, определялась микротвердость мишеней в зависимости от режимов облучения (рис. 6).

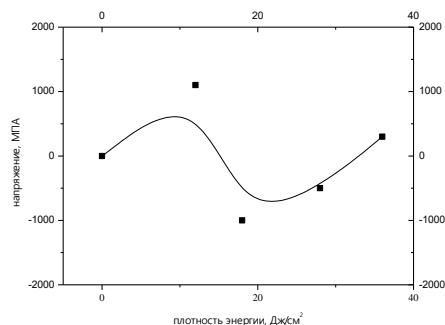


Рис. 5. Зависимость остаточных напряжений от плотности энергии в импульсе

Fig. 5. Residual stresses formed on the surface of targets made of VT8 alloys after irradiation with different energy densities

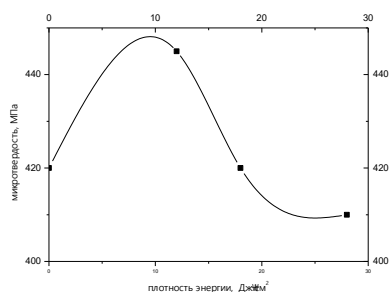


Рис. 6. Зависимость микротвердости от плотности энергии в импульсе при нагрузке 100 МПа

Fig. 6. Microhardness of targets made of VT8 titanium alloys after irradiation with different energy densities

Результаты измерений микротвердости и остаточных напряжений хорошо согласуются с данными анализа текстуры, формируемой в поверхностных слоях. Видно, только при облучении с низкими плотностями энергии наблюдается образование остаточных сжимающих напряжений и текстуры сжатия, что определяет упрочнение материала при измерении микротвердости.

Заключение

Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для модифицирования структуры в поверхностных слоях мишеней из сплава ВТ8. Установлено, что при облучении в поверхностных слоях лопаток протекают процессы формирования остаточных растягивающих или сжимающих напряжений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания №13.7418.2017/8.9 Financial support was provided by the Russian Ministry of Education and Science (project 13.7418.2017/8.9).

Библиографические ссылки

1. Шулов В.А., Новиков А.С., Энгелько В.И. Сильноточные электронные импульсные пучки для авиационного двигателя. Москва: Артек; 2012. 292 с.
2. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm Y. *GESA-1 and GESA-2 accelerators of intense pulsed electron beams Vacuum*, 2001; 62(2-3): 211-216.
3. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Структурно-фазовые изменения в поверхностных слоях деталей из титанового сплава ВТ6 при облучении сильноточными импульсными электронными пучками *Физика и химия обработки материалов* 2012; (3):18-25.
4. Perlovich Yu.A., Isaenkova M.G., Fesenko V.A. Three laws of substructure anisotropy of textured metal materials, revealed by X-ray method of generalized pole figures. *Materials Processing and Texture, Ceramic Transactions* 2008; 200: 539-546.
5. Shulov V.A., Gromov A.N., Terayev D.A., Perlovich Yu.A., Isaenkova M.G., Fesenko V.A. Texture Formation in the Surface Layer of VT6 Alloy Targets Irradiated by Intense Pulsed Electron Beams *Inorganic Materials: Applied Research* 2017; 8(3): 387–391.

References

1. il'notocnyye elektronnyye impul'snyye puchki dlya aviatsionnogo dvigatelestroeniya [Intense electron pulsed beams for aviation aircraft building] V.A. Shulov, A.S. Nivikov, V.I. Engelko. 2012; Moscow *Artek*, 292 p. (in Russia.).
2. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm Y. Pulsed electron beams facilities (GESA) for surface treatment of materials *Vacuum* 2001; 62: 211-214.
3. Shulov V.A., Paikin A.G., Bytzenko O.A., Teryaev D.A., Engelko V.I., Tkachenko K.I. Struktorno-fazovye izmeneniya v poverhnostnykh sloyah detaley iz titanovogo splava VT6 pri obluchenii sil'notocnyye elektronnyye impul'snyye puchkami. [Structure-phase changes in the surface layers of parts from VT6 titanium alloy during irradiation with intense pulsed electron beams] *Fizika i himiya obrabotki materialov* 2012; (3): 18-25. (in Russia).
4. Perlovich Yu.A., Isaenkova M.G., Fesenko V.A. Three laws of substructure anisotropy of textured metal materials, revealed by X-ray method of generalized pole figures. *Materials Processing and Texture, Ceramic Transactions* 2008; 200: 539-546.
5. Shulov V.A., Gromov A.N., Terayev D.A., Perlovich Yu.A., Isaenkova M.G., Fesenko V.A. Texture Formation in the Surface Layer of VT6 Alloy Targets Irradiated by Intense Pulsed Electron Beams *Inorganic Materials: Applied Research* 2017; 8(3): 387–391.