ФОРМИРОВНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МИШЕНЕЙ ИЗ СПЛАВОВ ВТ4 И ВТ20 ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ ВСЕХ СТОРОН 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⁾ ¹⁾Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе 4, 125993 Москва, А-80, ГСП-3, Россия, shulovva@ mail.ru ²⁾ММП имени В.В. Чернышева, Вишневая ул. 7, 123362 Москва, А-80, ГСП-7, Россия, teryaev a @avia500.ru ³⁾Московский инженерно-физический институт, Каширское шоссе 31, 1115409 Москва, Россия, perlovich@mail.ru

Проанализированы экспериментальные данные о влиянии одновременного облучения сильноточными импульсными электронными пучками (СИЭП) всех сторон мишеней из титановых сплавов ВТ4 и ВТ20 на формирование остаточных напряжений в поверхностных слоях. Эти данные имеют большое практическое значение, поскольку известно, что одностороннее облучение в режиме плавления мишеней из жаропрочных сплавов с последующим их поворотом приводит к образованию остаточных напряжений растяжения за счет механического воздействия обратной необлученной стороны, что снижает прочностные характеристики детали. В этой связи перспективным представляется применить одновременное облучение со всех сторон детали, однако подобные ускорители отсутствуют. Поэтому исследования были выполнены на конусобразных и пирамидоидальных образцах при перпендикулярном воздействии пучка. Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности при одновеременное всехностороннем воздействии на такие образцы является высокоэффективным инструментом для модифицирования поверхности, обеспечивающим проведение высокоскоростной термообработки (закалки), перекристаллизации материала в поверхности, обеспечивающим проведение высокоскорстной термообрабитки остаточных сжимающих напряжений. Сжимающие напряжения формируются при облучении с различными плотностями энергии от 20 Дж/см² до 30 Дж/см². Кроме того, при таких режимах облучения на поверхности образцов не происходит образования микродефектов в форме кратеров, т.е.отсутствуют концентраторы напряжений. Вышесказанное должно привести к упрочнению мишеней.

Ключевые слова: электронно-пучковая обработка; конусообразные и пирамидоидальные образцы; рентгеноструктурный анализ; остаточные напряжения; параметры решетки.

FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN THE SURFACE LAYERS OF VT4 AND VT20 ALLOY TARGETS DURING THE SIMULTANEOUS IRRADIATING OF PART ALL SIZES BY INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS

Vyacheslav Shulov¹), Oksana Bytsenko²), Dmitriy Teryaev¹), Igor Steshenko²), Yuriy Perlovich³), Margarita Isaenkova³), Vladimir Fesenko³) ¹⁾Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoye shosse, 125993 Moscow, Russia, shulovva@ mail.ru ²⁾Chernyshev Machine Building Enterprise, 7 Vishnevaya Street, A-80, GSP-7, 123362 Moscow, Russia, teryaev_a @avia500.ru ³⁾National Research Nuclear University MEPhI, 115409 Moscow, Russia, perlovich@mail.ru

The present paper reviews the experimental results dedicated to the effect of simultaneous irradiating with intense pulsed electron beam of everyone sides of VT4 and VT20 titanium alloys targets on formation of residual stresses into the surface layers. These data have a great practical significance because the simultaneous irradiating with melting regime of targets from refractory alloys with following their turning leads to formation of residual tensile stresses due to mechanical action of non-irradiated opposite side. It leads to decrease strengthening characteristics of parts. It is prospect to use the simultaneous irradiating of part all sizes but such accelerators are absent. Thus the investigations were made with the use of conical and pyramidal sampled at normal action of beam It is shown that intense pulsed electron beam of microsecond duration is high effective instrument for modification of samples from VT4 and VT20 alloys. It allow to realize high speed heat treatment (hardening), recrystallization of material in the surface layer sive residual stresses of 15-20 µm, purification and decrease of roughness of surface. It is possible to form in the surface layer compressive residual stresses with the use of simultaneous irradiating of part all sizes. The latter allows increase the strength of targets.

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

Введение

Разработка высокоинтенсивных технологий для повышения прочностных характеристик наиболее

ответственных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) является одной из важнейших проблем авиационного двигателестроения [1]. Очень часто ком-

13-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 30 сентября - 3 октября 2019 г., Минск, Беларусь 13th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 30 - October 3, 2019, Minsk, Belarus прессорные и турбинные лопатки, изготавливаемые из жаропрочных сталей, никелевых и титановых сплавов, являясь наиболее нагруженными компонентами, определяют ресурс 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], однако одностороннее облучение приводит к формированию остаточных растягивающих напряжений, особенно при высоких плотностях энергии, когда реализуется плавление материала в поверхностных слоях.



Рис. 1. Эпюры остаточных напряжений [5] в поверхностных слоях лопаток из сплава ВТ18У после СИЭП на режимах: 1 –плотность энергии в пучке - W=30 Дж/см², 1 импульс; 2 - W=20 Дж/см², 3 имп.; 3- W=20 Дж/см², 4 имп.

Fig. 1. Residual stresses [5] in the surface layers of VT18Y alloy blades after irradiation with intense electron beams by different regimes: 1 - energy demsity in beam W=30 J/cm², 1 pulse; 2 - W=20 J/cm², 3 pulses; 3 - W=20 J/cm², 4 pulses

В этой связи целью настоящей публикации являлась разработка технологических основ процессов электронно-лучевого модифицирования поверхности специально приготовленных конусообразных и пирамидоидальных образцов из титановых сплавов ВТ4 и ВТ20, для которых реализуются условия одновременного облучения всех сторон мишени. Определялись остаточные напряжения на разных участках облучаемой на ускорителе «Геза-ММП» поверхности с помощью рентгеноструктурного анализа.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались образцы диаметром 15 мм с конусом и пирамидой на одной стороне, что видно из рисунка 1. Состояние материала в поверхностных слоях образцов исследовалось методами: рентгеноструктурного анализа (РСА) и оптической металлографии. Методом РСА [4] определялись поверхностные остаточные напряжения, что позволяет прогнозировать прочностные свойства мишеней. Обработка мишеней СИЭП [1] была реализована в ускорителе "Геза-ММП" при следующих режимах: энергия электронов - 120 кэВ; длительность импульса - 30 мкс; плотность энергии в пучке – от 18-20 Дж/см² - 20-30 Дж/см²; площадь поперечного

сечения пучка – 80 см²; неоднородность распределения плотности энергии по сечению пучка – менее 10 %.



Рис. 2. Внешний вид образцов для исследования из сплавов ВТ4 и ВТ20

Fig. 2. Appearance of VT4 and VT20 alloy samples for investigation

Основным методом исследования являлся рентгеновский анализ. Исследования проводились на дифрактометре D8 DISCOVER с DAVINCI (Bruker, Германия) при использовании K_aизлучения меди. Анализ полученных результатов осуществлялся с помощью программного обеспечения Bruker AXS DIFFRAC.EVA v.4.2, DIFFRAC.TOPAS v.5.0, расчет макронапряжений при использовании программного обеспечения Bruker AXS LEPTOS.

Рентгеновские исследования предоставленных прутков включали в себя:

1) запись дифракционного спектра для проведения качественного фазового анализа и выбора рентгеновских отражений для последующего анализа структурного состояния материала поверхности образцов и измерения макронапряжений;

 регистрация отдельных рентгеновских линий для оценки структурного состояния и расчета параметров кристаллической решётки альфа-фазы, преобладающей в материале прутков;

3) измерение макронапряжений с использованием $sin^2\psi$ -метода.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследование представлены в таблице 1 и на рис. 3 и 4.



Рис. 3. Дифракционный спектр для конической поверхности образца BT20

Fig. 3. X-ray diffraction pattern of conical surface of VT20 sample

Из этих данных отчетливо видно, что облучение конусообразных и пирамидоидальных образцов при перпендикулярном падении пучка приводит к формированию остаточных сжимающих напряжений.

13-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 30 сентября - 3 октября 2019 г., Минск, Беларусь 13th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 30 - October 3, 2019, Minsk, Belarus



Рис. 4. Дифракционный спектр для пирамидоидальной поверхности образца BT4

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of pyramidal surface of VT4 sample.

Таблица 1. Результаты рентгеноструктурного анализа

Table 1. Results of X-ray analysis

		Макронапряжения, МПа	
Сплав	№ грани	σ _x	σ _y
BT-20	конус	325	432
BT-20	конус	-385	-243
ВТ-4 СИЭП	1	443	391
	2	441	494
	3	488	460
	4	502	530
ВТ-4 СИЭП	1	-424	-488
	2	-427	-452
	3	-237	-456
	4	-387	-433

Заключение

Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для модифицирования структуры в поверхностных слоях мишеней из сплавов ВТ4 и ВТ20. Установлено, что при одновременном облучении всех сторон детали в ее поверхностных слоях удается сформировать остаточные сжимающие напряжения при любых режимах обработки.

Это формулирует важнейшую задачу разработки новых ускорителей, обеспечивающих однородное облучение и упрочнение изделий различной формы и толщины путем формирования остаточных сжимающих напряжений.

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 двигателестроения. Москва: Артек; 2012.292 с.
- 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.
- 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.
- 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*, v. 200, 2008, p. 539-546.
- 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

- Sil'notocnnye electronnye impul'snye puchki dlya aviatzyonnogo 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.).
- Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm Y. Pulsed electron beams facilities (GESA) for surface treatment of materials. *Vacuum* 2001; 62: 211-214.
- 3. Structurno-fazovye izmeneniya v poverhnostnyh sloyah detaley iz titanovogo splava VT6 pri obluchenii sil'notocnnye electronnye impul'snye puchkami . [Structure-phase changes in the surface layers of parts from VT6 tita-nium alloy during irradiation with intense pulsed electron beams] Shulov V.A., Paikin A.G., Bytzenko O.A., Teryaev D.A., Engelko V.I., Tkachenko K.I. Fizika i himiya obrabotki materialov [Physics and chemistry of material treatment] 2012; (3):18-25. (in Russia).
- 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.
- 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.

¹³⁻я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 30 сентября - 3 октября 2019 г., Минск, Беларусь 13th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 30 - October 3, 2019, Minsk, Belarus