ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА ПРОЦЕСС КРАТЕРООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНЕЙ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

В.А. Шулов¹⁾, А.Н. Громов²⁾, Д.А. Теряев¹⁾, О.А. Быценко¹⁾, В.И. Энгелько³⁾

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

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

³⁾НИИ электро-физической аппаратуры имени Д.В. Ефремова, 189631, Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой 1, Россия, e-mail: engelko@niiefa.spb.ru

Методами электронной микроскопии и оптической металлографии изучено явление кратерообразования на поверхности лопаток турбины с жаростойким покрытием NiCrAlY, протекающее при облучении сильноточным импульсным электронным пучком. Показано, что использование сильноточного импульсного электронного пуча микросекундной длительности, как и мощного ионного пучка, приводит к формированию кратеров на поверхности вакуумно-плазменных покрытий NiCrAlY, однако из всего многообразия типов кратеров формируемых под действием мощных ионных пучков здесь наблюдается образование только кратеров с вогнутостью в центре и микрокапель, содержащих легколетучие компоненты покрытия.

Введение

Наиболее подробно явление кратерообразования было исследовано экспериментально в работах [1-4] и теоретически - в [5-7], которые были посвящены обработке металлов и сплавов мощным импульсным ионным пучком. В этих публикациях приведена классификация кратеров по времени их появления и по форме, определены их критические размеры (диаметр и глубина), очерчен круг возможных причин формирования и изучено влияние предварительной обработки поверхности на вероятность кратерообразования. Все это позволило авторам работ [1-4] сформулировать основные причины образования кратеров и предложить способы нивелирования их отрицательного влияния на свойства облучаемых импульсными ионными пучками деталей.

В настоящем исследовании в качестве инструмента обработки поверхности используются не мощные ионные пучки наносекундной длительности (t=50-100 нc) с энергией 250-300 кэВ, как в [1-4], а сильноточные электронные пучки микросекундной длительности (t=20-50 мкс) с энергией 115-120 кэВ, для которых характерна значительно большая толщина модифицированных поверхностных слоев (1-2 мкм - после воздействия МИИП и 20-25 мкм - после облучения СИЭП в ускорителях «Геза»). Однако, как было показано в [7], и после обработки СИЭП на поверхности мишеней появляются кратеры. Поэтому целью настоящего исследования являлось изучение причин протекания явления кратерообразования на поверхности лопаток турбины из жаропрочного никелевого сплава ЖС26НК с покрытием СДП-2 при их облучении СИЭП в сравнении с результатами, зафиксированными при использовании мощных ионных пучков [1-4]. Эти материалы нашли широкое использование в авиационной промышленности. поэтому обсуждаемые здесь данные имеют не только научный, но и практический интерес. В

этой связи нами были использованы терминология и методика, описанные в этих публикациях.

В [1-4] было высказано предположение о следующих наиболее вероятных механизмах кратерообразования при облучении материалов мошными ионными пучками (МИП): 1 – расслоение («филаментация») ионного пучка; 2 - филаментация электронной составляющей пучка, возникающей при нарушении работы системы согласования диода ускорителя (диод с самоизоляцией); 3 - выход на поверхность пузырьков газов, растворенных в приповерхностных областях; 4 - экранирование некоторых областей поверхности на начальной стадии действия импульса в результате образования неоднородного пароплазменного облака из легколетучих веществ, адсорбированных на поверхности, прежде всего углеводородов, а также фазовых составляющих сплава, имеющих высокую упругость паров или разлагающихся под пучком с выделением газов; 5 избирательность плавления отдельных участков поверхности, вследствие различия в температурах плавления фазовых составляющих сплава; 6 - нестационарное и различное по глубине плавление отдельных участков поверхности с различной ориентацией по отношению к направлению распространения пучка (е), обусловленное неадекватностью величин плотности ионного тока и пробегов ионов на образующих выступов и впадин, а также на соседних плоских поверхностях, перпендикулярных вектору е; 7 – взрывная эмиссия с острых участков поверхности, их локальный перегрев и избирательное интенсивное плазмообразование: 8 - избирательное плавление и плазмообразование, обусловленные степенью неоднородности распределения плотности дислокаций в пределах областей действия концентрированного потока энергии; 9 - бомбардировка уже расплавленной поверхности запаздывающими микрочастицами или плазменными сгустками, образованными при эрозии материала катода. Зафиксированные методом сканирующей

электронной микроскопии результаты анализа топографии поверхности образцов из жаропрочных сплавов позволили авторам работ [1-4] разделить формируемые кратеры на две группы в зависимости от стадии их появления: первичные кратеры (регистрируются непосредственно после одного импульса) и вторичные кратеры (выявляются или после повторного облучения, или после финишного диффузионного отжига). Далее в [1-4] первичные кратеры были классифицированы по форме и рельефу: круглые многокольцевые, круглые с выпуклостью в центре, круглые с вогнутостью в центре, эллиптические, смежные, ограненные и забоинообразные.

Материалы, оборудование и методики исследования

В качестве объектов исследования использовались лопатки турбины двигателя РД-33 и образцы из сплава ЖС26НК (Ni; 1,0-Ti; 5,6 — Cr; 6,2-Al; 1,4-Мо; 10,0-Со; 1,2-V; 1,4-N; 12,5-W; 0,18-C; <0,1-О, N;<0,02-H; <0,015-В, термообработка: отжиг при 1250 $^{\circ}$ С в вакууме в течение 3 ч, охлаждение со скорость 50-60 град/мин, стабилизирующий отжиг при 1000 $^{\circ}$ С в вакууме в течение 2 ч) с 60 микронным покрытием СДП-2 (основа-Ni; 18-22-Cr, 11-13,5-Al, 0,3-0,6-Y), нанесенным на установке МАП-1 по методике ВИАМ [8].

Часть лопаток до облучения разрезалась на электроэрозионном станке и исследовалась методами сканирующей электронной спектроскопии и оптической металлографии. Кроме этого измерялись микротвердость (H_{μ}) и шероховатость (R_a). Обработка лопаток СИЭП проводилась на ускорителях «Геза-2» и «Геза-ММП» в режимах кратерообразовия (энергия электронов — 115-125 кэВ; длительность импульса - 30-80 мкс; плотность энергии в пучке - 30-80 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка - 30-80 см²; неоднородность плотности по сечению пучка - 5%) [9].

Лопатки после облучения также разрезались и подвергались исследованию методами сканирующей электронной микроскопии и оптической металлографии.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Микроструктуры, формируемые в поверхностных слоях серийных и облученных лопаток из сплава ЖС26НК, представлены на рис. 1 и 2, а топография поверхности в зависимости от плотности энергии приведена на рис. 3-6. Особенностью использованных в настоящей работе мишеней, по сравнению с мишенями, облучаемыми в [1-4], было то, что они представляли собой не литой материал, а покрытие, полученное методом вакуумно-плазменной технологии высоких энергий, когда формируется большое количество микрокапельной фракции и, как следствие, микропор. Шероховатость таких мишеней много выше и достигает 2-3 мкм. На рис. 1 отчетливо видны микрокапли в составе покрытия на монокристаллической подложке.

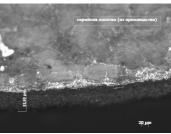


Рис. 1. Микроструктура формируемых вакуумно-дуговых покрытий СДП-2 на серийных лопатках после диффузионного отжига при 1050 $^{\circ}$ C

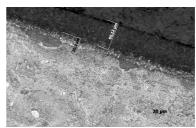
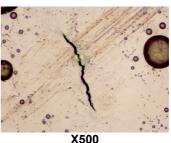


Рис. 2. Микроструктура, формируемая в поверхностном слое вакуумно-дуговых покрытий СДП-2, после облучения СИЭП при 42-45 Дж/см 2 четырьмя импульсами и диффузионного отжига при 1050 $^{\circ}$ C

Из микрорельефа, формируемого на поверхности лопаток с покрытием СДП-2, нанесенным по серийной технологии, видно, что облучение при низких плотностях энергии 20-36 Дж/см² сопровождается интенсивным растрескиванием и формированием на поверхности капельной фракции диаметром 1-20 мкм. Внутри капель отчетливо просматривается наличие отдельных кристаллитов правильной формы. При таких режимах облучения не все компоненты покрытия находятся в расплавленном состоянии, поэтому формирование микротрещин в процессе высокоскоростной кристаллизации вполне закономерно.



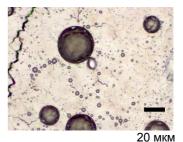


Рис. 4. Топография поверхности лопатки из сплава ЖС26HK с покрытием СДП-2 после облучения при 30-36 $Дж/cm^2$ (1 имп)

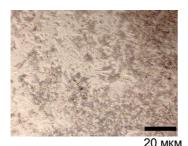


Рис. 5. Топография поверхности лопатки из сплава ЖС26HK с покрытием СДП-2 после облучения при 42-45 Дж/см 2 (1 имп)

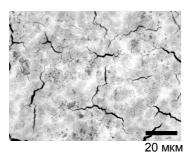


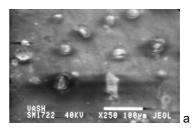
Рис. 6. Топография поверхности лопатки из сплава ЖС26HK с покрытием СДП-2 после облучения при 50-55 Дж/см 2 (1 имп)

Кроме того, присутствуют отдельные кратеры с вогнутостью в центре, другой же тип кратеров вообще отсутствует. Облучение же при плотности энергии 42-45 Дж/см² (рис. 5) позволяет зафиксировать равномерно оплавленную поверхность, на которой присутствуют тонкодисперсные кристаллиты и вытянутые пластины дендридного типа. Последнее хорошо согласуется с общими положениями теории кристаллизации Каишева-Странского об особенностях роста кристаллов в условиях высоких пересыщений [10].

Электронно-лучевая обработка при очень высоких плотностях энергии 50-55 Дж/см² (рис. 6) стимулирует интенсивное протекание процесса эрозии материала поверхности, заключающейся в его выносе в вакуум на макроуровне.

Большой научный интерес вызывает изучение процесса формирования капельной фракции на поверхности облучаемой детали. Эти данные представлены на рис. 7-9.

Сравнивая зафиксированные здесь данные с результатами исследования топографии поверхности лопаток компрессора ГТД из жаропрочных сталей и титановых сплавов после облучения сильноточными импульсными электронными пучками [1-4] можно сделать предположение о единой природе процесса формирования микронеоднородностей в том и другом случаях. Однако для покрытий СДП-2 характерно формирование не углублений, хотя отдельные кратеры с вогнутостью в центре присутствуют, а выпуклостей в форме капель на поверхности мишеней. Результаты рентгеновского микроанализа при съемке из такой капли (рис. 10) свидетельствуют о том, что основным элементом в ее окрестности является алюминий (рис. 10, до 86 ат.%). В этой связи можно сделать заключение о том, что в процессе



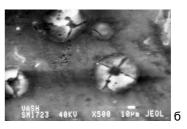


Рис. 7. Распределение капельной фракции по поверхности покрытия СДП-2 на лопатке из сплава ЖС26НК после облучения при 26-30 Дж/см 2

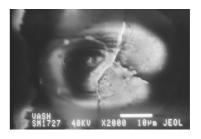


Рис. 8. СЭМ изображение микрокапли на поверхности покрытия СДП-2 после вдавливания алмазной пирамидки

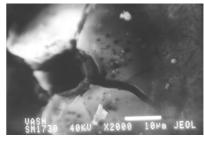


Рис. 9. СЭМ изображение микрокапли на поверхности покрытия СДП-2 из окрестности которой проведен рентгеновский микроанализ

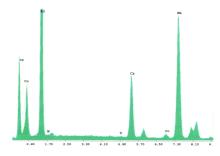


Рис. 10. Результаты РМА покрытий СДП-2 после электронно-лучевой обработки при w=22-26~ Дж/см $^2,~$ n=1 (регистрация с поверхности капли на рис. 3)

облучения протекает процесс абляции наиболее легколетучих фрагментов покрытия на макроуровне с последующей конденсацией капли на уже закристаллизованной поверхности. Подобная микронеоднородность обладает низкой адгезией, легко удалятся с поверхности механически и разрушается при небольшой нагрузке на индентер (рис. 8) при измерении микротвердости (H_{μ} =90±10 ед. HV величина близкая к значениям микротвердости характерной для чистого алюминия).

Кроме того, такие микродефекты не влияют на усталостные свойства, так как не являются концентраторами напряжений и могут быть легко удалены с поверхности.

Заключение

Показано, что использование сильноточного импульсного электронного пуча микросекундной длительности, как и мощного ионного пучка, приводит к формированию кратеров на поверхности вакуумно-плазменных покрытий NiCrAlY, однако из всего многообразия типов кратеров формируемых под действием МИП здесь наблюдается образование только кратеров с вогнутостью в центре и микрокапель, содержащих легколетучие компоненты покрытия.

Установлено, что при воздействии СИЭП протекает процесс абляции наиболее легколетучих фрагментов покрытия на макроуровне с последующей конденсацией капли на уже закристаллизованной поверхности. Формирование микрока-

пель не приводит к снижению усталостных свойств облучаемых деталей.

Список литературы

- В. А. Шулов, А. Г. Пайкин, А.Ф. Львов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия 2007. №1. С. 9-15.
- Yatsui K. J. Laser and Particle Beams. 1989. Vol. 7. -P. 733-749.
- 3. *Шулов В.А., Ремнев Г.Е., Ночовная Н.А.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1995. №6. С. 77-91.
- 4. В.А. Шулов, А.Г. Пайкин, А.Б. Белов, В.И. Энгелько и др.// Физика и химия обработки материалов. 2005. №2. С. 32-41.
- 5. Волков Н.Б., Майер А.Е., Яловец А.П. // ЖТФ. 2003. -Т. 73, в. 3. - С. 1-9.
- 6. Волков Н.Б., Майер А.Е., Яловец А.П. // Письма в ЖТФ. - 2002. - Т. 72, в. 8. - С. 34-38.
- 7. А.Я. Лейви, А.Е. Майер, В.А. Шулов, А.П. Яловец // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. №11. С. 12-17.
- 8. Мубояджан С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Материалы 6-той Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками. ТПУ, Томск, 23-28 сентября. 2002. С. 561-563.
- Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. // J. Vacuum. - 2001. - Vol. 62. - P. 211-214.
- 10. *Каблов Е.Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей. М.: МИСиС, 2001. 632 с.

THE EFFECT OF IRRADIATING REGIMES WITH INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS ON CRATER CREATION TAKING PLACE ON THE SURFACE OF TARGETS FROM NICKEL ALLOYS

V.A. Shulov¹⁾, A.N. Gromov²⁾, D.A. Teryaev¹⁾, O.A. Bytzenko¹⁾, V.I. Engelko³⁾

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

¹⁾Chernyshev Machine Building Enterprise, 7 Vishnevaya Street, A-80, GSP-3, Moscow 123362, Russia, Tel.: (495) 4914988, Fax: (495) 4915652, e-mail: teryaev_a@avia500.ru

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

Crater creation phenomenon on the surface of turbine blades with NiCrAlY resistant coating during irradiation with intense pulsed electron beams was investigated with the use of scanning electron microscopy and optical metallography. It is shown that the use of intense pulsed electron beam as well as high power pulsed ion beam leads to creation of craters on the surface of vacuum-plasma NiCrAlY coatings but among numerous types of craters formed under the action of high power pulsed ion beams here only round-shaped craters with the concavity in the centre and microdrops with light-vapor components of coatings are created.