

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ МОЛИБДЕНОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Л.П. Бащенко, С.А. Невский

*Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова 42, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк 654007, Россия,
Luda.baschenko@gmail.com, nevskiy_sa@physics.sibsiu.ru*

Изучено влияние обработки низкоэнергетическим сильнотоочным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см^2 и длительностью импульса 50 мкс на формирование рельефа поверхности молибденовой быстрорежущей стали, предварительно подвергнутой высокотемпературному отпуску. Методами сканирующей электронной микроскопии установлено, что рельеф поверхности представлен кратерами размерами от 5 до 250 мкм. Средний размер кратеров составляет 91.3 ± 63.1 мкм, а наиболее вероятный размер находится в интервале от 40 до 50 мкм. Проведен сравнительный анализ механизмов формирования кратеров на основе представлений о развитии неустойчивостей Рэлея-Тейлора, Рихтмайера-Мешкова и термокапиллярной неустойчивости на границе раздела расплава и плазмы. При рассмотрении этих неустойчивостей по отдельности они не дают адекватного объяснения образования кратеров данного размерного диапазона. Анализ начальной стадии комбинированной термо-, концентрационно-капиллярной неустойчивости и Рэлея-Тейлора с учетом давления отдачи паров позволил установить трехмодовую зависимость скорости роста возмущений поверхности раздела расплава и плазмы от длины волны.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь; электронно-пучковая обработка; покрытие; рельеф поверхности; твердость; износостойкость; концентрационно-капиллярная неустойчивость; термо-капиллярная неустойчивость.

THE RELIEF OF THE MOLYBDENUM SURFACE HIGH-SPEED STEEL FORMING DURING ELECTRON BEAM PROCESSING

L.P. Bashchenko, S.A. Nevsky

Siberian State Industrial University

*42 Kirova Str., 654007 Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, Russia,
Luda.baschenko@gmail.com, nevskiy_sa@physics.sibsiu.ru*

The effect of treatment with a low-energy high-current electron beam with an electron beam energy density of 30 J/cm^2 and a pulse duration of 50 microseconds on the formation of the surface relief of molybdenum high-speed steel previously subjected to high-temperature tempering has been studied. Using scanning electron microscopy, it was found that the surface relief is represented by craters ranging in size from 5 to 250 microns. The average size of the craters is 91.3 ± 63.1 microns, and the most probable size is in the range from 40 to 50 microns. A comparative analysis of the crater formation mechanisms is carried out based on the concepts of the development of Rayleigh-Taylor, Richtmayer-Meshkov instability and thermocapillary instability at the interface of melt and plasma. When considering these instabilities individually, they do not provide an adequate explanation for the formation of craters in this size range. The analysis of the initial stage of combined thermo-, concentration-capillary instability and Rayleigh-Taylor, taking into account the vapor recoil pressure, allowed us to establish a three-mode dependence of the growth rate of disturbances at the interface of the melt and plasma on the wavelength.

Keywords: high-speed steel; electron beam processing; coating; surface relief; hardness; wear resistance; concentration-capillary instability; thermo-capillary instability.

Введение

Быстрорежущие стали охарактеризуются высокими твердостью и износостойкостью. Однако при эксплуатации изделий в жестких условиях (высокая скорость резания, большие ударные нагрузки

ки) наблюдается значительное снижение срока службы [1], что ставит задачу повышения эксплуатационных характеристик поверхности материала.

К способам повышения износостойкости быстрорежущих сталей можно отне-

сти модификацию поверхности электронным пучком [2]. Такая обработка по сравнению с традиционной характеризуется высокой эффективностью, максимальным использованием энергии и небольшой деформацией изделия, не приводит к загрязнению окружающей среды. При электронно-пучковой обработке (ЭПО) происходит практически мгновенный нагрев поверхности материала (10^8 - 10^{10} К/с), а затем быстрое охлаждение (10^8 - 10^9 К/с) [3]. Под воздействием температурного градиента происходит перераспределение химических элементов, измельчение зерен, равномерное распределение эвтектических карбидов, формируется метастабильная структура поверхности, вследствие чего более высокие значения характеристик поверхности материал. Однако при такой обработке на поверхности формируются микротрещины и другие элементы рельефа, которые при эксплуатации провоцируют изнашивание. Образование кратеров и других элементов рельефа поверхности после электронно-пучковой обработки – результат сложных физических процессов, происходящих на границе раздела расплава и плазмы, которые зависят от различного рода гидродинамических неустойчивостей [4-6].

Целью настоящей работы является поиск механизмов образования рельефа поверхности при электронно-пучковой обработке на основе представлений о возникновении и развитии гидродинамических неустойчивостей путем сравнительного анализа влияния неустойчивостей Рэлея-Тейлора, Рихтмайера-Мешкова и термокапиллярной неустойчивости на процесс образования кратеров.

Результаты и их обсуждение

В качестве материала исследования была выбрана молибденовая быстрорежущая сталь марки M10 (SAE-AISI M10 (T11310) Molybdenum High-Speed Steel). В исходном состоянии поверхность имеет зеренную структуру, по границам зерен располагаются протяженные прослойки

второй фазы (карбиды) (рис. 1а). При ЭПО происходит кардинальное преобразование поверхности: образуются микрократеры (рис. 1б), исчезает карбидная сетка, формируются микротрещины (рис. 1в).

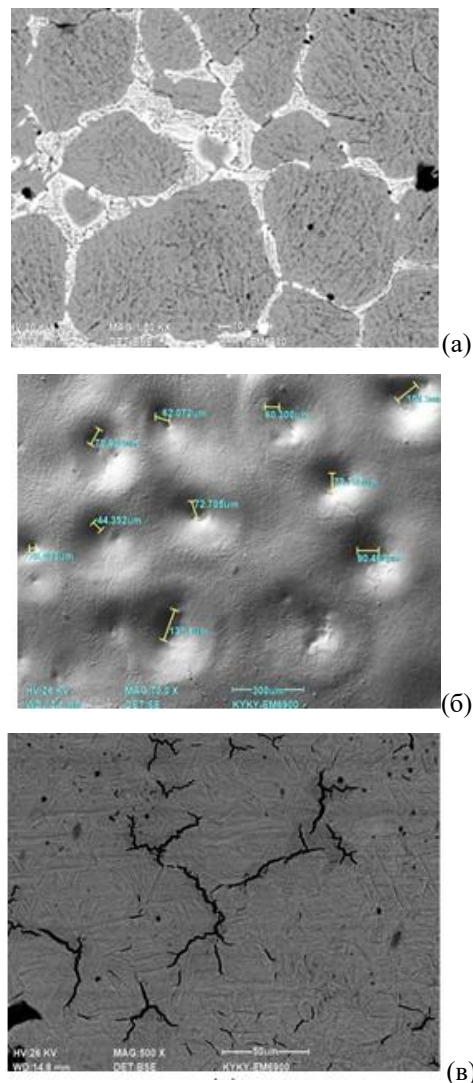


Рис. 1. Структура поверхности молибденовой быстрорежущей стали до электронно-пучковой обработки (а) и после нее (б, в)

Образование микрократеров зависит от режимов ЭПО [4, 5] и обусловлено различными факторами: возникновением неустойчивости Рихтмайера-Мешкова (ускоренное расширение нагреваемого пучком вещества и образование плазменного факела) [4], термокапиллярной конвекции, обусловленной перегревом областей вблизи включений [5], наличием в материале газовых примесей и выходом

пузырьков газа на расплавленную поверхность, расслоением электронного пучка.

На поверхности наблюдается скачок температуры до 3200 К в интервале от 0.009 до 0.05 мс, что указывает на интенсивное испарение вещества. На глубине от 5 до 20 мкм материал находится в расплавленном состоянии. Время нахождения материала в расплавленном состоянии – 372 мкс. Такое время существования паровой прослойки и расплавленного слоя указывает на то, что в материале могут одновременно протекать несколько видов неустойчивостей.

Минимальное значение размеров кратера по данным сканирующей электронной микроскопии составляет 5.7 мкм. Учет испарительного давления показал, что при $p_v = 10^5$ Па неустойчивость начинается с длины волны $\lambda = 9.4$ мкм. Дальнейший учет термоэлектрических эффектов показывает, что при $\alpha = 0.1$ В/К неустойчивость начинается в субмикрометровом диапазоне, а наибольшая мода возмущений наблюдается при длине волны 1.5 мкм, что объясняет, например, формирование ячеек кристаллизации [7].

На неустойчивость Рэлея-Тейлора при ЭПО [4] указывает формирование плазменного факела. В результате на границе плазмы и расплава развивается данная неустойчивость и образуется кратер.

Однако модель вязко-потенциального течения жидкости не дает адекватного объяснения образованию кратеров при ЭПО даже при учете тепломассопереноса. Объяснение формированию кратеров размерами более 50 мкм дает наличие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова.

Заключение

Неустойчивости Рэлея-Тейлора, Рихтмайера-Мешкова и термокапиллярная неустойчивость (даже при учете испарения и термоэлектрических эффектов) не объясняют формирования кратеров размерами

от 5 до 250 мкм на поверхности материала при ЭПО с плотностью энергии 30 Дж/см² и длительностью импульса 50 мкс. Необходимо учитывать влияние концентрации молибдена на поверхностное натяжение расплава железа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186/>.

Библиографические ссылки

1. Мозговой И.В., Шнейдер Е.А. Наплавка быстрорежущей стали. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 200 с.
2. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Осетковский В.Л., Башенко Л.П. Структурно-фазовое состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной наплавкой в среде азота и высокотемпературным отпуском. *Известия вузов. Физика* 2019; 62(10): 106-111.
3. Peng W., Hao S., Zhao L., Li Z., Chen J., Lan J., Wang X., Wang K. Thermal stability of modified surface microstructure on WC-Co cemented carbide after high current pulsed electron beam irradiation. *Journal of Alloys and Compounds* 2020; 829: 154545.
4. Волков Н.Б., Майер А.Е., Талала К.А., Яловец А.П. О механизме образования микрократеров на поверхности мишени, облучаемой мощным электронным пучком. *Письма в Журнал технической физики*. 2006; 32(10): 20-29.
5. Марков А.Б., Мейснер Л.Л., Яковлев Е.В., Мейснер С.Н., Гудимова Е.Ю., Петров В.И. Кратерообразование на поверхности нержавеющей стали и никелида титана, облученных низкоэнергетическим сильнотоочным электронным пучком: морфология и топография. *Известия вузов. Физика* 2015; 58(9): 173-178.
6. Zhou Y., Williams R.J.R., Ramaprabhu P., Groom M., Thornber B., Hillier A., Mostert W., Rollin B., Balachandar S., Powell P.D., Mahalov A., Attal N. Rayleigh–Taylor and Richtmyer–Meshkov instabilities: A journey through scales. *Physica* 2021. V. D. 423. № 132838.
7. Nevskii S.A., Konovalov S.V., Osintsev K.A., Ivanov Yu.F., Granovskii A.Y., Gromov V.E. The mechanism of formation of surface micro- and nanostructures in the AlCoCrFeNi high-entropy alloy during electron-beam treatment. *Letters on Materials* 2021; 11(3): 309-314.