

5. *Sali A. and Blundell T.L.* Comparative protein modelling by satisfaction of spatial restraints // J. Mol. Biol. 1993. Vol. 234, No. 3. P. 779–815.
6. *Laskowski R.A. et al.* PROCHECK: A Program To Check the Stereochemical Quality of Protein Structures // J. Appl. Cryst 1993. Vol. 26, Part 2. 283–291.
7. *Smith L.J. et al.* Analysis of main chain torsion angles in proteins: prediction of NMR coupling constants for native and random coil conformations // J. Mol. Biol. 1996. Vol. 255, No. 3. P. 494–506.
8. *Lewis P.N., Momany F.A. and Scheraga H.A.* Chain reversals in proteins // Biochim. Biophys. Acta. 1973. Vol. 303, No. 2. P. 211–229.
9. *Andrianov A.M.* Global and Local Structural Properties of the Principal Neutralizing Determinant of the HIV-1 Envelope Protein gp120 // J. Biomol. Struct. Dynam. 1999. Vol. 16. P. 931–953.
10. *Chandrasekhar K., Profy A.T. and Dyson H.J.* Solution Conformational Preferences of Immunogenic Peptides Derived from the Principal Neutralizing Determinant of the HIV-1 Envelope Glycoprotein gp120 // Biochemistry. 1991. Vol. 30. P. 9187–9194.

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ФАЗОВО-СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ТВЁРДОСТЬ СПЛАВА T15K6

М. В. Карабовский, А. К. Кулешов

Воздействие сильноточными электронными пучками является перспективным направлением повышения износостойкости, прочности металлообрабатывающего инструмента из твёрдых сплавов. Упрочнение металлов и сплавов воздействием концентрированных потоков энергии основано на локальном нагреве поверхностного слоя, в том числе и выше температуры плавления и последующем охлаждении этого поверхностного слоя со сверхкритическими скоростями (выше $\sim 10^4$ К/с). В результате таких воздействий на рабочей кромке инструмента может образовываться упрочненная зона с высокой плотностью дефектов, измененным фазовым составом, дисперсной структурой, что способствует повышению твердости и износостойкости модифицированного инструмента.[2]

В качестве объекта исследования использовался спеченный твердый сплав T15K6, имеющий по данным рентгеноспектрального анализа следующий усредненный элементный состав: W – 46 ат. %, Ti – 12 % ат. %, Co – 5 ат. %. С.

В данной работе исследовано изменение морфологии поверхности, фазового состава и твердости поверхностных слоев сплава T15K6 в зависимости от плотности энергии при обработке сильноточными электронными пучками (СЭП). Обработка сплава проводилась 5 импульсами с длительностью ~ 100 мкс. Плотность падающей энергии при воздействии одним импульсом СЭП составляла значения 10, 30, 40 и 50 Дж/см².

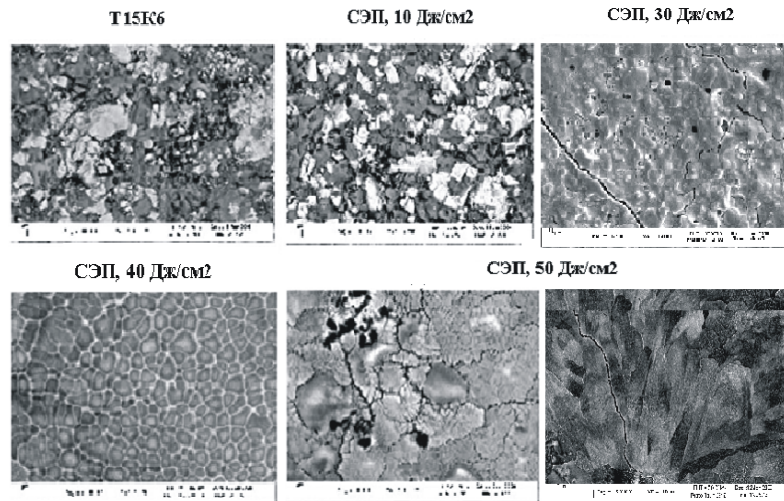


Рис. 1. РЭМ изображения поверхности образцов в зависимости от плотности энергии воздействия СЭП

Из полученных данных (рис.1) следует, что обработка СЭП с $J_E = 10$ Дж/см² приводит к частичному поверхностному оплавлению зерен карбидов сплава. Увеличение J_E до 30 Дж/см² формирует полностью оплавленный слой с относительно гладкой поверхностью, появляются поры, кратеры и трещины. Воздействие энергии с плотностью 40 Дж/см² приводит к формированию ячеистой структуры. При СЭП воздействии с $J_E = 50$ Дж/см² появляются дендритные образования с неоднородным распределением их по размерам от долей мкм до нескольких десятков мкм.

Появление кратеров, пор, трещин – результат быстрого охлаждения расплава, состоящего из неоднородных компонент с различными теплофизическими свойствами. Ячеистая и дендритная структуры формируются в результате сверхбыстрой кристаллизации расплава.

По данным СЭМ (рис.2а) концентрация вольфрама в поверхностном слое твердого раствора возрастает до 75%. В соответствии с фазовой

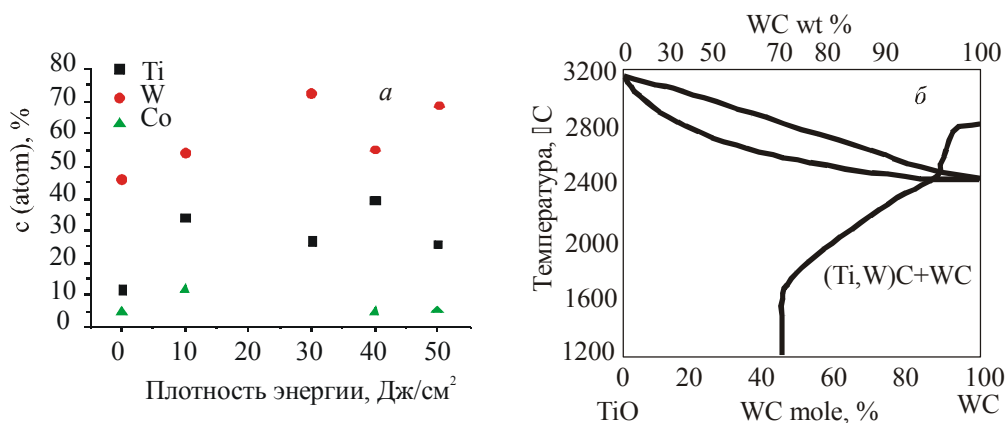


Рис.2 Распределение элементов в поверхностном слое сплава (а) и фазовая диаграмма сплава (W,Ti)C (б)

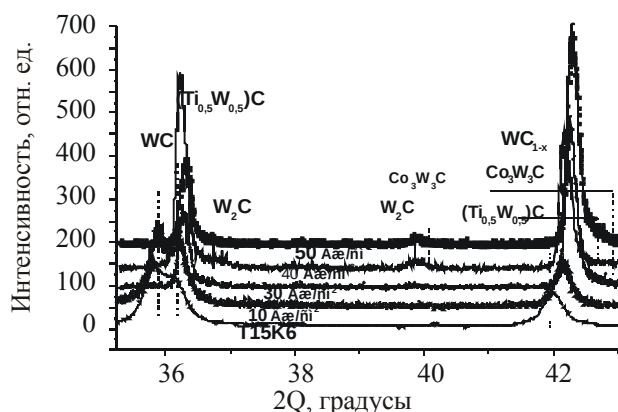


Рис.3 Участки рентгенограмм от поверхностных слоев твердого сплава после воздействия СЭП с различными плотностями энергии

после СЭП воздействия (рис.3) и сопоставление их с литературными данными [3] также подтверждает формирование, с ростом плотности энергии воздействия, пересыщенного вольфрамом твердого раствора (W,Ti)C.

Увеличение интенсивности дифракционного пика соответствующего твердому раствору с ростом плотности энергии после СЭП связано с ростом объемной доли твердого раствора, а следовательно, формированием более толстого слоя пересыщенного твердого раствора. При СЭП обработке формируются новые фазы ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, W_2C , WC , WC_{1-x}), объемная доля которых возрастает при увеличении плотности энергии воздействия.

Следует отметить значительное уменьшение ширины дифракционного пика твердого раствора при СЭП обработке (табл.1), что связано с более крупной совершенной кристаллической структурой сформированного слоя твердого раствора.

Таблица

Параметр решетки (a) твердого раствора $(\text{Ti}_{1-x}\text{W}_x)\text{C}$, полуширина на полувысоте (Δ), его дифракционного пика, размер блоков и микронапряжение (σ) после СЭП обработки

Плотность энергии, Дж/см ²	a, нм	Δ , (10^{-3} рад)	Размер блоков, нм
T15K6	0,4326	3,8	40,5
СЭП, 10	0,4319	2,6	59,2
СЭП, 30	0,4284	2,0	77,1
СЭП, 40	0,4272	1,8	85,3
СЭП, 50	0,4270	1,5	102,3
$(\text{Ti}_{15}\text{W}_{85})\text{C}$	0,4318 нм	$(\text{Ti}_{15}\text{W}_{85})\text{C}_{1-x}$	0,4235 нм

Уменьшение значения параметра решетки твердого раствора по отношению к величине 0,4322 нм, соответствующей равному содержанию Ti и W в твердом растворе карбидов, означает превышение вольфрамом равновесной концентрации в твердом растворе, т.к. атомный радиус вольфрама меньше, чем титана. Значение параметра решетки твердого раствора при воздействии СЭП становится меньше 0,4322 нм (табл.). Из литературы [1] известно, что при уменьшении содержания углерода в твердом растворе (W,Ti)C значение его параметра решетки уменьшается до 0,4235 нм. По-нашему мнению, уменьшение значения параметра решетки твердого раствора после воздействия СЭП обусловлено обеднением его углеродом.

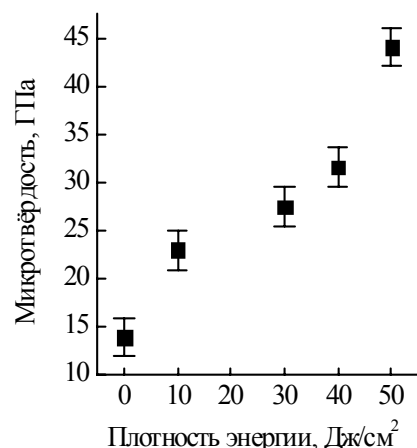


Рис. 4 Твердость поверхностных слоев сплава

Результаты измерения твердости, представленные на рис.4. Более значительное увеличение твердости при высоких плотностях энергии обработки обусловлено возрастанием доли вольфрама в поверхностном слое твердого раствора $(W_{1-x}Ti_x)C_{1-y}$, формированием более крупных дендритных образований, а также, образованием дополнительных карбидных фаз вольфрама, в том числе и высокотвердого карбида W_2C .

ВЫВОДЫ:

Установлено, что с ростом плотности энергии воздействия СЭП на твердый сплав Т15К6 происходит плавление и растворение частиц карбидов сплава с формированием пересыщенного по вольфраму и обеднённого по углероду твердого раствора $(W_{1-x}Ti_x)C$. Характерной особенностью морфологии модифицированного слоя является формирование ячеистой и дендритной структуры с ростом плотности энергии воздействия. Твердость поверхностного слоя сплава Т15К6 при воздействии СЭП возрастает в 1,5 – 3 раза.

Литература

1. *Ivanov Y.F., Proskurovsk D.I.* y Pulsed electron-beam treatment of WC-TiC-Co hard-alloy cutting tools^ wear resistance and microstructural evolution. Surface and Coating Technology 125(2000) 251-256.
2. *Uglov V.V., Remnev G.E., Kuleschov A.K., Cherenda N.N., Astashinski V.M., Saltyakov M.S.* // Proceedings of 9th international conference Modification of materials with particle beams and plasma flows, Tomsk, Russia, Publishing house of the IAO SR RAS, 2008, P.349-352.
3. *Mas-Guindal M.J.* Self-propagating high-temperature synthesis of TiC-Wc composite materials/Journal of Alloys and Compounds 419 (2006) 227–233.