

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ВНУТРЕННЮЮ СТРУКТУРУ ТВЕРДОГО СПЛАВА Т15К6

Е.А. Солдатенко¹⁾, Ю.А. Колубаева²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь
тел. +375 17 2095512, e-mail: uglov@bsu.by

²⁾Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия, e-mail: koval@opee.hcei.tsc.ru

В работе изучено влияние плотности энергии (10–80 Дж/см²) и длительности импульсов (100, 150 и 200 мкс) воздействия сильноточными электронными пучками (СЭП) на формирование слоистой внутренней структуры твердого сплава Т15К6, состоящей из зон полного проплавления и контактного плавления частиц карбидов, а также зоны со структурой исходного твердого сплава. Выявлено, что образование подобной структуры обуславливает повышение микротвердости и уменьшение коэффициента трения приповерхностных слоев твердого сплава в 3 и 3,5 раза соответственно.

Введение

На сегодняшний день спеченные титано - вольфрамовые твердые сплавы являются одним из основных материалов инструментальной промышленности. Входящий в их состав карбид титана повышает твердость и износостойкость по сравнению с вольфрамовыми твердыми сплавами при одновременном уменьшении прочности и увеличении хрупкости [1], что негативно влияет на эксплуатационные характеристики твердосплавных инструментов.

Известны способы модифицирования механических свойств твердых сплавов, заключающиеся в изменении состава карбидной и связующей составляющих [1, 2]. Также существуют методы упрочнения твердосплавного инструмента путем его дополнительной термической или механической обработки [3]. В последнее время широкое применение получили методы поверхностной обработки материалов концентрированными потоками энергии, в частности, сильноточными электронными пучками (СЭП).

Цель данной работы заключалась в изучении изменений внутренней структуры твердого сплава Т15К6 в зависимости от плотности энергии и длительности импульсов СЭП.

Методика эксперимента

В качестве объекта исследования выбран спеченный твердый сплав Т15К6 (79 WC- 15 TiC – 6 Co, мас.%).

Обработка образцов электронным пучком проводилась на импульсной электронно-пучковой установке «SOLO» [4] 5 импульсами с частотой их следования 0,3 Гц при энергии ускоренных электронов 18 кэВ. Варьируемыми параметрами являлись плотность энергии воздействия (10–80 Дж/см²) и длительность импульсов (100, 150 и 200 мкс) СЭП.

Поперечные шлифы образцов изучались с использованием растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP. Для получения информации о структуре использовались отраженные электроны. Микротвердость поверхностных слоев измерялась методом Виккерса на приборе Wilson Instruments 402MVD путем вдавливания алмазной

пирамидки при нагрузке 2 Н. Трибологические испытания по схеме «палец-плоскость» проводились в условиях сухого трения в течение 30 мин при этом нагрузка составляла 1,0 Н.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Известно, что облучение СЭП оказывает тепловое действие на материал.

Для расчета распределения температуры по глубине твердого сплава методом конечных элементов с помощью математического пакета FEMLAB (Comsol Multiphysics) решалось одномерное уравнение теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.

Из полученных зависимостей (рис. 1а) следует, что обработка серии образцов с постоянной длительностью импульсов (100 мкс) СЭП приводит к плавлению всех компонентов системы. В случае, когда воздействие СЭП осуществлялось при постоянной плотности энергии 50 Дж/см² (рис. 3б) температура в поверхностном слое достигает температуры плавления всех компонентов системы только при длительности импульсов 100 мкс.

Следуя выявленному распределению температуры по глубине образцов, можно сделать предположение о формировании многослойной структуры твердого сплава (рис. 2), состоящей из областей (1) полного проплавления и (2) контактного плавления частиц карбидов, а также зон без изменения структуры исходных карбидов с (3) и без (4) плавления кобальтовой связки. При этом следует отметить, что при воздействии импульсами СЭП постоянной длительности ширина выделенных областей увеличивается (рис. 3а), снижение же плотности поглощенной мощности с увеличением длительности импульсов при постоянной плотности энергии приводит к уменьшению и увеличению глубины слоев (1), (2) и (3) соответственно (рис. 3 б).

Формирование многозонной структуры подтверждается и экспериментальными результатами (рис. 4).

Внешний переплавленный слой (1) (~ 0,2 мкм) обогащен вольфрамом, о чем свидетельствует более светлый контраст этой области на РЭМ - изображении.

Зоны (1) и (2) характеризуются столбчатой структурой, состоящей преимущественно из твердого раствора (Ti, W)C, границы при этом образованы вольфрамосодержащей фазой W_2C [5]. Основанием же для разделения этих зон служит поперечный размер столбчатых зерен, составляющий ~ 0,3 и 1 мкм для зон (2) и (3) соответственно. Следует отметить тот факт, что в слое (3) форма зерен становится более равноосной.

Возможной причиной формирования зон (2) и (3) является конечное значение скорости распространения тепловой волны в объем образца, а также уменьшение скорости охлаждения с удалением от облученной поверхности [6]. Тогда, можно предположить, что кристаллизация расплавленного слоя начинается с поверхности [7] твердого сплава с формирования столбчатых зерен, вытянутых по направлению интенсивного направленного отвода теплоты - вглубь образца.

Далее, вследствие уменьшения температурных градиентов с увеличением расстояния от поверхности твердого сплава и образования поверхностного закристаллизовавшегося слоя, находящегося при повышенной температуре, т.е. при уменьшении направленности отвода тепла, происходит образование зоны (3), состоящей из зерен с более равноосной формой.

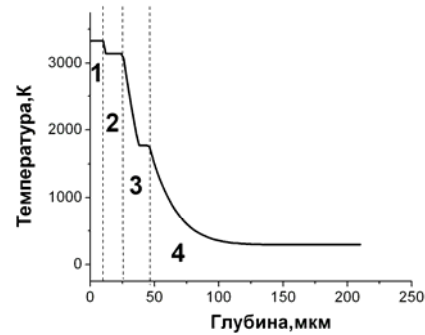
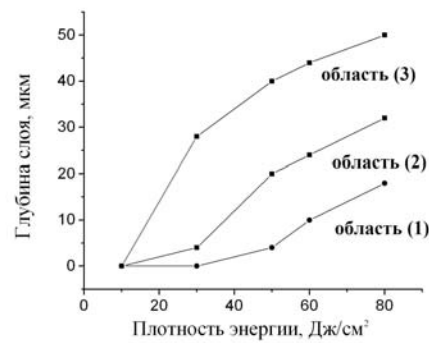
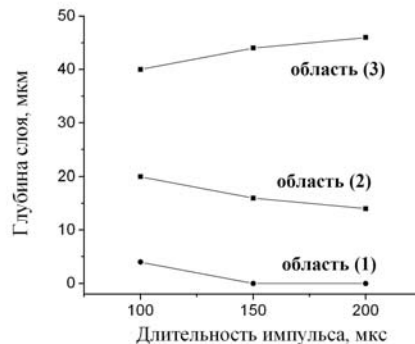


Рис. 2. Зонная структура на примере распределения поля температур в твердом сплаве после воздействия импульсами СЭП длительностью 100 мкс и плотностью энергии 60 Дж/см².

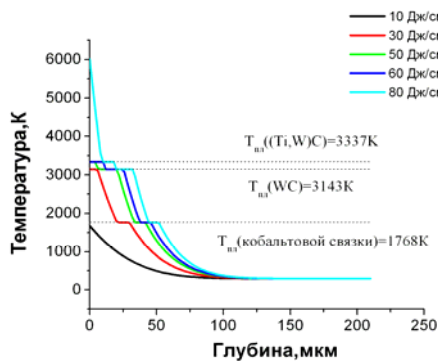


а)

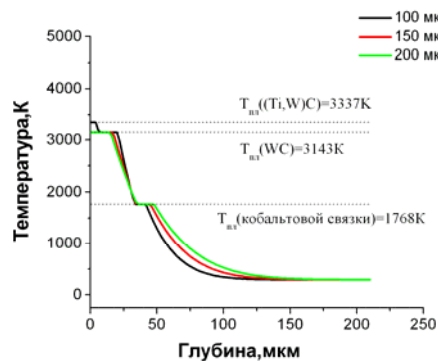


б)

Рис. 3. Ширина областей (1-3) в твердом сплаве после воздействия импульсами СЭП с постоянной длительностью 100 мкс (а) и плотностью энергии 50 Дж/см² (б)



а)



б)

Рис. 1. Пространственное распределение поля температур в твердом сплаве после воздействия импульсами СЭП с постоянной длительностью импульсов 100 мкс (а) и плотностью энергии 50 Дж/см² (б).

Зоны (1-3) составляют область (1) структурных превращений, представляющую собой переплавленный слой, отличающийся высокой дисперсностью частиц карбидов и большей плотностью их распределения. Глубина слоя (1-3) после воздействия импульсами СЭП длительностью 100 мкс изменяется от ~ 5 мкм (50 Дж/см²) до ~ 15 мкм (80 Дж/см²), что хорошо согласуется с проведенными теоретическими расчетами (рис. 3а, область 1) (~ 5 мкм (50 Дж/см²) и ~ 18 мкм (80 Дж/см²)).

Дальше следует слой (4) контактного плавления зерен карбидов, глубина которого составляет

более 10 мкм (рис. 4). Характерной особенностью структуры этого слоя является увеличение относительной концентрации вольфрама на границах зёрен карбидов (Ti, W)C вследствие меньшей температуры плавления карбидов WC по сравнению с (Ti,W)C ($T_{пл}(WC) = 3143K$, $T_{пл}((Ti,W)C) = 3337K$).

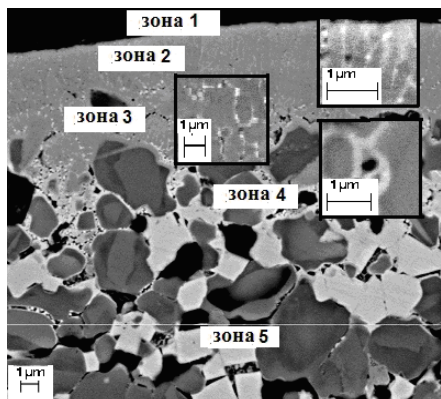


Рис. 4. Поперечное сечение твердого сплава T15K6 после воздействия СЭП в режиме 60 Дж/см², 200 мкс.

Структура слоя (5) идентична структуре исходного твердого сплава.

Варьирование длительности импульсов при постоянной плотности энергии приводит к аналогичным изменениям внутренней структуры твердого сплава. Однако, следует отметить, что с увеличением длительности импульсов при плотности энергии 50 Дж/см² поперечный размер зёрен в зоне (2) возрастает, граница между слоями (2) и (3) становится менее четкой и при 200 мкс эти зоны не различимы (глубина расплавленного слоя уменьшается с ~ 5 мкм (100 мкс) до ~ 4 мкм (200 мкс)).

Формирование подобной внутренней структуры является одной из возможных причин повышения микротвердости (до трех раз) и уменьше-

ния коэффициента трения (до 3,5 раз вследствие повышения стойкости к адгезионно-усталостному износу) приповерхностных слоев твердого сплава.

Заключение

После воздействия СЭП на твердый сплав T15K6 вследствие формирования предельных температурных градиентов (~10⁷ К/м) его внутренняя структура становится многозонной. Она состоит из зоны структурных превращений, зоны контактного плавления карбидов, переходящих в зону со структурой исходного твердого сплава. Подобная структура дает вклад в повышение микротвердости и уменьшение коэффициента трения приповерхностных слоев твердого сплава в 3 и 3,5 раза соответственно.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта БРФФИ (№Ф10Р-085) и РФФИ (проект № 10-08-90007).

Список литературы

1. Панов В.С., Чувиллин А.М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. Учебное пособие для вузов. – М.: МИСИС, 2001. – 428с.
2. Jianwei Liu, Xianfeng Ma, Huaguo Tang, Wei Zhao. // J. of Alloys and Comp. - 2011. - 509. - P. 33.
3. Брюхов В.В. Повышение стойкости инструмента методом ионной имплантации. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 120 с.
4. Koval N.N., Ivanov Yu.F. // Russian Physics Journal, - 2008. - 5. - P. 505.
5. Углов В.В., Коваль Н.Н., Кулешов А.К., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Солдатенко Е.А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2011. - 4. - С. 50.
6. А. Д. Погребняк, О. П. Кульментьева. // ФИП. - 2003. - 2. - С. 108.
7. Шепель Д.А., Марков А.Б. // Письма в ЖТФ. - 2011. - 16. - С. 63.

INFLUENCE OF LOW-ENERGY HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM ENERGY DENSITY AND PULSE DURATION ON T15K6 HARD ALLOY INNER STRUCTURE

E.A. Soldatenko¹⁾, Yu.A. Kolubaeva²⁾

¹⁾Belarusian State University,

Nezavisimosti ave., 4, 220030 Minsk, Belarus,

tel. +375 17 2095512, e-mail: uglov@bsu.by

²⁾High Voltage Research Institute at Tomsk Polytechnic University,

634055, Russia, Tomsk, 2a Lenin ave., e-mail: koval@opee.hcei.tsc.ru

In this work influence of energy density (10–80 J/cm²) and duration of pulses (100, 150, 200 μs) of low-energy high-current electron beams on formation of T15K6 hard alloy layer structure was studied. This structure consists of the layer of full melting, the layer of carbides contact melting and the layer with structure similar to initial hard alloy one. This structure is supposed to contribute to increase of microhardness and decrease of friction coefficient in 3 and 3,5 times appropriately.