

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА Т40

Ю.Ф.Иванов^{1,2)}, В.Е.Овчаренко³⁾, А.В.Белый⁴⁾, Ю.А.Денисова¹⁾,
А.Д.Тересов¹⁾, П.В.Москвин¹⁾, Н.Н.Коваль¹⁾

¹⁾Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, Томск, Россия, *yufi55@mail.ru*

²⁾Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Томск, Россия

³⁾Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
634021, Томск, Россия, *ove45@mail.ru*

⁴⁾Физико-технический институт НАН Беларуси
220141, Минск, Беларусь, *phfi@belhost.by*

Показано, что обработка системы пленка (титан, 1 мкм)/подложка (твердый сплав Т40) высокоинтенсивным импульсным электронным пучком сопровождается формированием на поверхности твердого сплава многофазного наноструктурированного слоя с градиентной структурой, микротвердость которого более чем в 2,5 раза превышает микротвердость сердцевины образца.

Введение

Разработка и применение в современных отраслях машиностроения новых материалов, обладающих уникально высокими эксплуатационными свойствами, определяют все более возрастающие требования к физическим и прочностным свойствам металлообрабатывающего инструмента. Традиционно производимый российской инструментальной промышленностью инструмент на основе вольфрамсодержащих и безвольфрамовых твердых сплавов в настоящее время не удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям как по уровню физических, так и по уровню эксплуатационных свойств.

Целью настоящей работы является экспериментальная разработка физической концепции наноструктурирования поверхностных слоев вольфрамсодержащих твердых сплавов с кобальтовой связкой как перспективного в промышленном отношении метода повышения физических, прочностных и эксплуатационных свойств твердосплавных металлорежущих пластин. Физическое обоснование данного подхода состоит в создании условий одновременной реализации в поверхностном слое твердого сплава трех независимых физико-металлургических процессов – формирования в поверхностном слое наноструктурных состояний при сверхскоростном нагреве до аномально высоких температур с последующим сверхскоростным охлаждением, микролегирования кобальтовой связки в поверхностном слое элементами предварительно нанесенного на поверхность тонкопленочного покрытия и образования подсистемы наноразмерных частиц тугоплавких химических соединений в межчастичных прослойках кобальтовой связки с целью стабилизации наноструктурных состояний в поверхностном слое твердого сплава при повышенных температурах нагрева поверхностного слоя твердосплавной пластины при резании металла. В результате сказанного в поверхностном слое твердого сплава формируется многоуровневое структурно-фазовое состояние, определяющее возможность смены доминирующего механизма

роста разрушающей трещины: последовательное продвижение вершины трещины в мезоскопически неповрежденном материале сменяется образованием в голове трещины ограниченного набора микроразрывов сплошности с последующим их объединением в микротрещины разрушения [1].

Материал и методика исследования

В качестве исследуемого материала был выбран твердый сплав марки Т40 (75%WC + 14% (Ti, Ta, Nb)C) с кобальтовой связкой (11% Co). На модифицируемую поверхность предварительно напыляли пленку титана, используя модернизированную установку вакуумно-дугового напыления типа ННВ 6.6-И1 [2]. Скорость формирования покрытия ~0,12 мкм/мин, толщина покрытия ~1 мкм и ~2 мкм. Импульсный нагрев поверхностного слоя твердого сплава с титановым покрытием осуществляли на установке «СОЛО» высокоинтенсивными низкоэнергетическими электронными пучками, обеспечивающими закалку поверхностного слоя из состояния расплава со скоростями охлаждения до 10^8 К/с. Данные условия термической обработки позволяют формировать в поверхностном слое металллокерамического (твердого) сплава неравновесную nano- и субмикрористаллическую многофазную структуру [3].

Исследования модифицированного слоя осуществляли методами рентгенофазового анализа, оптической, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Прочностные характеристики материала изучали, определяя микротвердость поверхностного слоя.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости микротвердости поверхностного слоя твердого сплава Т40 после импульсного электронно-пучкового облучения его поверхности с покрытием из титана от величины плотности энергии в электронном пучке.

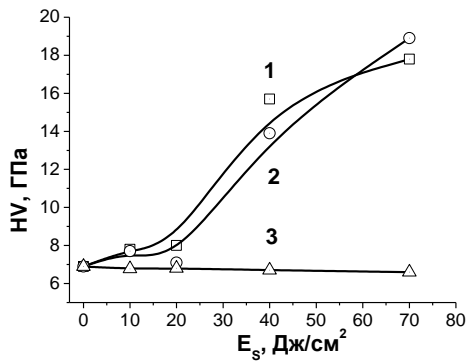


Рис. 1. Зависимости величины микротвердости поверхностного слоя твердого сплава Т40 от величины плотности энергии в пучке электронов при постоянных значениях длительности (150 мкс), частоты ($0,3 \text{ с}^{-1}$) и количества импульсов облучения (15): 1 – толщина покрытия из титана ~ 1 мкм; 2 – толщина покрытия из титана ~ 2 мкм; 3 – твердый сплав без покрытия

Отчетливо видно, что увеличение микротвердости поверхностного слоя твердого сплава наблюдается лишь в случае переплава системы покрытие/твердый сплав, имеющего место при плотности энергии пучка электронов более 20 Дж/см^2 . Далее, упрочнение поверхностного слоя изменяется немонотонным образом и определяется не только величиной плотности энергии пучка электронов, но и толщиной покрытия: если при толщине покрытия ~ 1 мкм микротвердость поверхностного слоя в результате облучения поверхности твердого сплава уже приближается к предельному значению при плотности энергии пучка $\sim 70 \text{ Дж/см}^2$ (рис. 1, кривая 1), то при толщине покрытия ~ 2 мкм при указанной плотности энергии пучка электронов микротвердость поверхностного слоя достаточно интенсивно повышается (рис. 1, кривая 2). При облучении твердого сплава без покрытия (так же, как и при толщине покрытия ~ 5 мкм) микротвердость облученного материала снижается с ростом плотности пучка электронов (рис. 1, кривая 3).

Фазовый состав поверхностного слоя твердого сплава, обработанного электронным пучком, исследовали методами рентгеноструктурного анализа. Установлено, что в режиме переплава поверхностного слоя и покрытия ($E_s = 40 \text{ Дж/см}^2$ и более) в поверхностном слое фиксируется образование ряда новых для данного материала фаз: W_2C ; $(TiW)C_2$; $W_{0,2}C_{0,8}$.

Морфологию фаз и их взаимное расположение, а также элементный состав поверхностного слоя твердого сплава исследовали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии при анализе тонких фольг поперечного сечения облученного образца.

Исследование поверхностного слоя твердого сплава Т40 после электронно-пучкового облучения выявили следующие характерные типы его микроструктуры. Во-первых, расположенная непосредственно на поверхности облучения тонкая ($80 \dots 140 \text{ нм}$) пленка (рис. 2, а).

Во-вторых, слой со структурой ячеистого типа, расположенный непосредственно под пленкой (рис. 2, а). Размеры ячеек указанной структуры изменяются в пределах от 150 нм до 300 нм и увеличиваются по мере удаления от поверхности облучения. Ячейки разделены прослойками второй фазы толщиной $30 \dots 50 \text{ нм}$ (рис. 2, а, прослойки указаны светлыми стрелками).

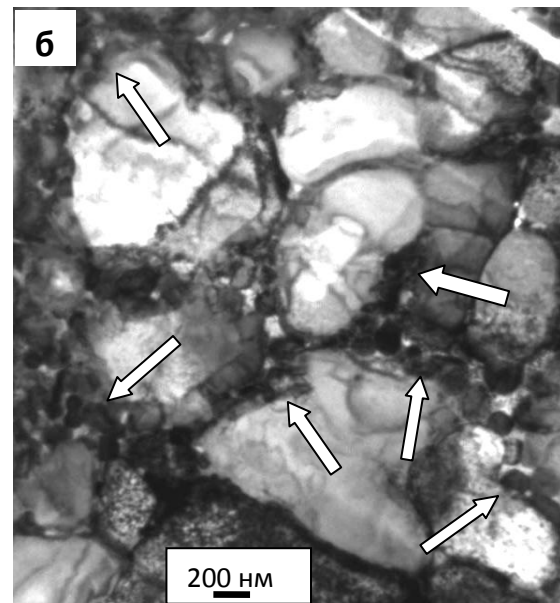
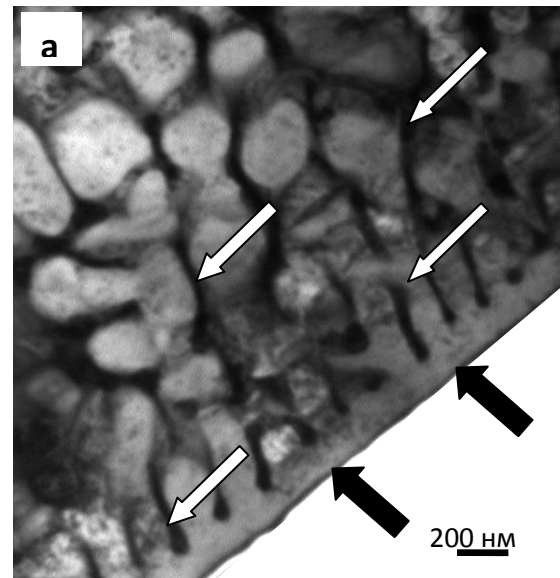


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения поверхностного слоя твердого сплава Т40, обработанного электронным пучком. Стрелками указаны: на (а) пленка на поверхности облучения твердого сплава (темные стрелки) и прослойки в слое с ячеистой структурой (светлые стрелки); на (б) – включения округлой формы

В-третьих, слой из микрокристаллитов ограниченной формы (размеры микрокристаллитов изменяются в пределах от $0,5 \text{ мкм}$ до $1,0 \text{ мкм}$) (рис. 2, б). По границам кристаллитов расположены включения округлой формы, размеры которых

(80...200) нм (рис. 2, б, включения указаны стрелками).

Методами микрорентгеноспектрального анализа (использовали метод картирования) был проведен анализ характера распределения Co, Ti, W и C на фоне выявленных структурных составляющих поверхностного слоя твердого сплава T40 после электронно-пучкового облучения. Можно констатировать, что прослойки (рис. 2, а), разделяющие ячейки кристаллизации, обогащены кобальтом и вольфрамом и обеднены по титану, тонкая поверхностная пленка, а также ячейки кристаллизации в промежуточном слое обогащены титаном, вольфрамом и углеродом.

В слое из микрокристаллитов карбидной компоненты (рис. 2, б) кобальт и вольфрам распределены в виде прослоек между кристаллитами глобулярной и ограненной форм. Вольфрамом обогащены и наноразмерные включения округлой формы. Кристаллиты глобулярной и ограненной формы обогащены титаном, вольфрамом и углеродом.

Прямая идентификация фазового состава выявленных структурных элементов поверхностного слоя твердого сплава T40 после электронно-пучкового облучения его поверхности была проведена методом микродифракционного анализа при электронно-микроскопическом исследовании структуры тонких фольг на просвет.

Индицирование микроэлектроннограмм показывает, что тонкая пленка и ячеистая структура сформированы в результате образования карбида (Ti, W)C_x, а прослойки, разделяющие ячейки, в результате образования фазы Co₇W₆. Индицирование микроэлектроннограмм, полученных с округлых включений, расположенных на границах ячеистой структуры, позволило выявить, наряду с рефлексами карбидной фазы (Ti, W)C_x, присутствие рефлексов β-W (ОЦК кристаллическая решетка). Результаты микродифракционного анализа межчастичных прослоек, расположенных в структуре с карбидной фазой глобулярной мор-

фологии, и последующее индицирование микроэлектроннограмм, полученных с данного объема фольги, позволило выявить, наряду с рефлексами карбидной фазы (Ti,W)C_x, присутствие рефлексов кобальта (ГЦК кристаллическая решетка).

Заклучение

1. Выявлены оптимальные режимы облучения и сформирован на поверхности твердого сплава T40 многофазный наноструктурированный слой в виде градиентной слоистой структуры, приводящий к повышению более чем в 2,5 раза микротвердости поверхностного слоя твердого сплава.

2. Показано, что непосредственно на облучаемой поверхности твердого сплава образуется пленка толщиной (80...140) нм из литого карбида состава (Ti,W)C_x, переходящая через промежуточный слой с ячеистой структурой из наночастиц тройного карбида (Ti, W)C_x с межчастичными прослойками из фазы Co₇W₆ в слой из кристаллитов тройного карбида (Ti, W)C_x глобулярной и ограненной форм с прослойками из кобальтового связующего.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 11-08-00453) и Проекта №5 фундаментальных исследований НАН Беларуси и СО РАН.

Список литературы

1. Псахье С.Г., Овчаренко В.Е., Князева А.Г., Шилько Е.В. // Физическая мезомеханика. - 2011. - Т.14, №6. - С.23.
2. Григорьев С.В., Девятков В.Н., Денисов В.В., Коваль Н.Н., Лопатин И.В., Шугуров В.В., Яковлев В.В. // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. - 2010. - №2. - С.86.
3. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Известия ВУЗов. Физика. - 2008. - №5. - С.60.

STRUCTURE AND PROPERTIES ELECTRON-BEAM MODIFICATION OF A HARD ALLOY T40 SURFACE LAYER

Yu.F.Ivanov^{1, 2)}, V.E.Ovcharenko³⁾, A.V.Belyy⁴⁾, Yu.A.Denisova¹⁾, A.D.Teresov¹⁾, P.V.Moskvin¹⁾, N.N.Koval¹⁾

¹⁾Institute of High Current Electronics SB RAS, 634055, Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru

²⁾National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Russia

³⁾Institute of Strength Physics and Materials Science, 634021, Tomsk, Russia, ove45@mail.ru

⁴⁾Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
220141, Minsk, Belarus, phti@belhost.by

It is shown that the treatment of the system film (titanium, 1 μm)/substrate (hard alloy T40) by high-intensity pulsed electron beam is accompanied by the formation on the hard alloy surface of the multiphase nanostructured layer with a gradient structure. Directly on the irradiated surface of the hard alloy is formed a film with thickness of (80 ... 140) nm of molten carbide composition (Ti,W)C_x, passing through an intermediate layer with a cellulate structure of triple carbide nanoparticles (Ti,W)C_x with interparticle layers of phases Co₇W₆ in layer of triple carbide crystallites (Ti,W)C_x globular and faceted shapes with layers of cobalt binder. Formation of nanostructured layer structure increases the micro-hardness of hard alloy surface layer more than 2.5 times.