# Модификация металлокерамической структуры твердого сплава при электронноионно-плазменном облучении

## В. Е. Овчаренко, Ю. Ф. Иванов, К. В. Иванов, А. А. Моховиков, Сюй Юнь Хуа, Ли Шен Чжун, Юй Баохай

Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных о характере структурно-фазовых состояний, формирующихся в поверхностном слое твердого сплава с высоким содержанием керамической компоненты (более 90 %) при импульсном облучении электронным пучком в плазмах инертных газов с различными значениями энергии ионизации и атомной массы и влияния формирующихся структурно-фазовых состояний на стойкость поверхностного слоя твердого сплава при резании металла. Показано, что эффективность импульсного электронно-ионноплазменного облучения как метода наноструктурирования керамической компоненты в поверхностных слоях твердых сплавов зависит от значений энергии ионизации и атомной массы плазмообразующего газа — с понижением энергии ионизации и повышением атомной массы плазмообразующего газа происходит ускорение процессов растворения в расплаве металлического связующего частиц керамической компоненты, проявляется ускоренное диспергирования керамических частиц до наноразмерной масштабности. В результате наноструктурирования керамической компоненты в поверхностных казано частиц керамической компоненты, проявляется ускоренное диспергирования керамических частиц до наноразмерной масштабности. В результате стойкость пластин из твердого сплава при резании металла.

*Ключевые слова:* металлокерамическая структура, импульсное электронно-ионное облучение, плазмообразующий газ, энергия ионизации, атомная масса, керамическая компонента, наноструктурирование.

#### Введение

Структурно-фазовое упрочнение поверхностных слоев промышленных твердых сплавов, содержащих более 90 масс.% керамической компоненты в виде высокотвердых карбидов (вольфрама, тантала, титана, ниобия и др.) с целью повышения ресурса работы металлообрабатывающего инструмента является одной из приоритетных задач современного материаловедения в машиностроении. Перспективным направлением указанной модификации поверхностного слоя твердых сплавов является наноструктурирование его металлокерамической структуры. Последнее возможно при условии реализации межфазного взаимодействия компонентов металлокерамической композиции в неравновесных условиях сверхвысокоскоростного нагрева поверхностного слоя с последующим сверхскоростным охлаждением.

На примере металлокерамического сплава с высоким содержанием металлического связующего (50:50) установлено, что в результате микролегирования металлического связующего элементами керамической компоненты в межчастичных прослойках металлокерамической структуры образуется каркас из наноразмерных частиц тугоплавких карбидов, происходит смена доминирующего механизма зарождения и роста трещин разрушения твердого сплава: последовательное продвижение вершины трещины в мезоскопически неповрежденном материале сменяется образованием в голове трещины ограниченного набора микроразрывов сплошности с последующим их объединением в микротрещины разрушения. В результате снижается величина коэффициента трения и повышается стойкость поверхностного слоя при его взаимодействии с высокотвердым контртелом [1,2]. Достигнутый эффект кратно повышается при наноструктурировании в поверхностном слое керамической компоненты при облучении металлокерамического сплава в плазме инертных газов криптона и ксенона, имеющих низкие значения энергии ионизации при высоких значениях атомной массы [3].

Цель настоящей работы — проведение сравнительного анализа характера структурно-фазовых состояний, формирующихся в поверхностном слое твердого сплава с высоким содержанием керамической компоненты (более 90 %) при импульсном облучении электронным пучком в плазмах инертных газов с различными значениями энергии ионизации и атомной массы и влияния формирующихся структурно-фазовых состояний на стойкость поверхностного слоя твердого сплава при резании металла.

#### Материал и методы исследования

В качестве исследуемого материала был выбран промышленный твердый сплав марки T40 (75 % WC +14 % (Ti, Ta, Nb)C) с кобальтовой связкой (11 % Co). Импульсный нагрев поверхностного слоя пластин из твердого сплава осуществляли электронными пучками, обеспечивающими закалку поверхностного слоя из состояния расплава со скоростями охлаждения до 10<sup>8</sup> К/с. Режим облучения: плотность энергии пучка электронов  $E_S = 40 - 90 \, \text{Дж/см}^2$ ; длительность импульса воздействия пучка электронов  $\tau = 150$  мс; количество импульсов облучения N = 15; частота следования импульсов  $f = 0,3 \text{ c}^{-1}$ . Облучение проводили при остаточном давлении в рабочей камере плазмообразующего инертного газа 0,02 Па. В качестве плазмообразующих газов были применены инертные газы с различными значениями энергии ионизации при различных величинах атомной массы (табл. 1).

Исследования структурно-фазового состояния поверхностного слоя твердого сплава слоя были проведены методами оптической микроскопии (Neofot 32), сканирующей (Zeiss LEO EVO 50) и просвечивающей (JEOL JEM-2100F) электронной микроскопии. Натурные испытания обработанных электронным пучком режущих пластин проводили в

Таблица 1 Значения энергии ионизации инертных газов при различных величинах атомной массы

Плазмообразующий	Энергия ионизации,	Атомная масса,
газ	кДж/моль	г/моль
Ν	1401,5	14,00674
Ar	1519,6	39,948
Xe	1170,0	131,29

условиях токарной обработки стали 40X до предельно допустимой степени износа режущей кромки 0,2 мм.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Структура поверхности пластины из твердого сплава Т40 в исходном состоянии представлена на рис. 1. Отчетливо видно, что основной компонентой сплава являются частицы карбидных фаз (W,Ti,Ta,Nb)C. Частицы имеют ярко выраженную неравноосную форму, их размеры составляют от 0,5 до 3 мкм.

Облучение твердого сплава в режиме высокоскоростного плавления поверхностного слоя приводит к кардинальным изменениям структуры материала. На макроскопическом уровне структуры облучение, независимо от элементного состава плазмы газового разряда, сопровождается формированием на поверхности твердого сплава структуры островкового типа, характерное изображение которой приведено на рис. 2. Островки имеют пористую структуру. Основной причиной появления пор является высвобождение углерода, имеющее место при разложении карбидной фазы, образование газообразных соединений углерода с кислородом с последующим выходом на поверхность и разрушение поверхностного слоя материала. При количественном анализе структуры на макроуровне выявляется тенденция к уменьшению размеров островков с пористой структурой с увеличением плотности энергии в электронном пучке.

Мезоуровень структуры поверхностного слоя формируется в результате кристаллизации расплавленного поверхностного слоя (рис. 3). Установлено, что формирование указанной структуры в значительной мере зависит от вида плазмообразующего



Рис. 1. Структура поверхности металлокерамического сплава в исходном состоянии: 1 – межчастичные прослойки Со, 2 – (W, Ti, Ta, Nb)С частицы.

Перспективные материалы 2016 № 5



Рис. 2. Микроструктура поверхности твердого сплава после импульсного электронно-ионно-плазменного облучения (длительность импульсов облучения 150 мкс, 15 импульсов) при: *a* − 40 Дж/см<sup>2</sup> в N-содержащей, *б* − в Ar-содержащей, *в* − в Xe-содержащей плазме; *г* − 60 Дж/см<sup>2</sup> в N-содержащей, *д* − в Ar-содержащей, *e* − в Xe-содержащей плазме; *ж* − 70 Дж/см<sup>2</sup> в N-содержащей, *з* − в Ar-содержащей плазме.



Рис. 3. Микроструктура поверхности твердого сплава после импульсного электронно-ионно-плазменного облучения (длительность импульсов облучения 150 мкс, 15 импульсов) при: *a* – 40 Дж/см<sup>2</sup> в N-содержащей, *б* – в Ar-содержащей, *в* – в Xe-содержащей плазме; *г* – 60 Дж/см<sup>2</sup> в N-содержащей, *д* – в Ar-содержащей, *е* – в Xe-содержащей плазме; *ж* – 70 Дж/см<sup>2</sup> в N-содержащей, *з* – в Ar-содержащей плазме.

Перспективные материалы 2016 № 5

газа — при переходе от азота к аргону и далее к ксенону происходит повышение дисперсности частиц керамической компоненты твердого сплава. Указанный эффект повышается с увеличением плотности энергии в электронном пучке. Так, если при  $E_S = 40 \, \text{Дж/см}^2$  размер частиц изменяется в пределах  $4 - 10 \, \text{мкм}$ , то при  $E_S = 70 \, \text{Дж/см}^2$  интервал изменения размера зерен —  $2 - 5 \, \text{мкм}$ .



<u>500 нм</u> б



Рис. 4. Микроструктуры поверхностного слоя твердого сплава после импульсного электронно-ионноплазменного облучения: *a* – в азотсодержащей, *б* – аргонсодержащей, *в* – ксенонсодержащей плазмах газового разряда.

С целью получения данных о структуре поверхностного слоя твердого сплава на микроуровне в зависимости от режимов импульсного электронноионно-плазменного облучения и природы плазмообразующего газа были проведены исследования микроструктуры методом просвечивающей электронной микроскопии. Образы для просвечивающей электронной микроскопии были получены методом FIB (Focused Ion Beam) на ионно-электронном микроскопе Quanta 200 3D, оснащенным микроманипулятором Omniprobe 107.

Установлено, что облучение сплава Т40 в азот- и аргонсодержащих плазмах газового разряда приводит к фрагментации керамических частиц в поверхностном слое твердого сплава — в керамических частицах субмикронных размеров ( $\approx 500$  нм) формируется субзеренная структура с малыми углами разориентации (рис. 4a, 4b). В то же время облучение в ксенонсодержащей плазме формирует в поверхностном слое металлокерамическую структуру с керамическими частицами с нано- и субмикронными размерами с большими углами разориентации (рис. 4a). О последнем свидетельствует ярко выраженный черно-белый контраст на изображении микроструктуры поверхностного слоя.

Облучение в ксенонсодержащей плазме формирует в объеме керамических частиц металлокерамической структуры поверхностного слоя твердого сплава микродвойники деформационного происхождения (рис. 5).

Представленные результаты позволяют констатировать, что применение в качестве плазмообразующего газа ксенона, благодаря более низкой энергии ионизации и проявлению ударной (вторичной) ионизации при соударении ионов тяжелых инертных



Рис. 5. Двойниковая структура, формирующаяся в керамических частицах поверхностного слоя твердого сплава при импульсном электронно-ионноплазменном облучении в ксенонсодержащей плазме.

Перспективные материалы 2016 № 5



Рис. 6. Зависимости временной стойкости поверхностного слоя твердого сплава (75 % WC + 14 % (Ti,Ta,Nb)C)/11 % Со при резании металла (сталь 45) от плотности энергии в электронном пучке при импульсном электронно-ионно-плазменном облучении (150 мкс, 15 имп.) в азот-, аргон-, ксенонсодержащей плазмах газового разряда.

газов с нейтральными атомами, создает условия более полной ионизации плазмообразующего газа, обеспечивая переход от электронно-пучкового режима облучения к электронно-ионно-плазменному облучению поверхности твердого сплава. При этом в процесс импульсного электронно-ионно-плазменного воздействия на поверхностный слой твердого сплава значительный вклад вносит ударное воздействие ионов тяжелых инертных газов. Другими словами, процесс наноструктурирования керамической компоненты поверхностного слоя твердого сплава может происходить как за счет межфазного взаимодействия компонентов металлокерамической композиции при сверхвысокоскоростном нагреве поверхностного слоя до аномально высоких температур, так и за счет механического (ударного) воздействия тяжелых ионов частицы керамической компоненты.

Наноструктурирование керамической компоненты и формирование двойниковых структур в керамических частицах при импульсном электронноионно-плазменном облучении являются признаками повышения трещинностойкости керамических материалов, повышения их прочности в условиях ударного нагружения [4]. На рис. 6 представлены результаты испытаний пластин из твердого сплава при резании металла после импульсного электронноионно-плазменного облучения в N-, Ar- и Хесодержащих плазмах в зависимости от плотности энергии в электронном пучке.

#### Выводы

Эффективность импульсного электронно-ионноплазменного облучения как метода наноструктурирования керамической компоненты в поверхностных слоях твердых сплавов зависит от значений энергии ионизации и атомной массы плазмообразующего газа — с понижением энергии ионизации и повышением атомной массы плазмообразующего газа происходит ускорение процессов растворения в расплаве металлического связующего частиц керамической компоненты, проявляется ускоренное диспергирование керамических частиц до наноразмерной масштабности.

В результате наноструктурирования керамической компоненты в поверхностном слое в 1,5 раза повышается стойкость пластин из твердого сплава при резании металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 гг." (Соглашение № 14.613.21.0049 от 11.11.2015г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI61315X0049).

#### Литература

- Ovcharenko V.E., Ivanov Yu.F., Yu Bao Hai. Effect of nanostructural surface modification of tribological properties of metal-ceramic alloy. Rare Metals, 2009, v. 28, spec. issue, p. 678 – 682.
- Psakhie S., Ovcharenko V., Yu Baohai, Shilko E., Astafurov S., Ivanov Yu., Byeli A., Mokhovikov A. Influence of features of interphase boundaries on mechanical properties and fracture pattern in metal-ceramic composites. J. Mater. Sci. Technol., 2013, v. 29, iss. 11, p. 1025 – 1034.
- Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Иванов Ю.Ф., Моховиков А.А. Закономерности формирования и влияние многомасштабных наноразмерных структур на физические свойства поверхностного слоя твердого сплава. Известия ВУЗов. Физика, 2013, т. 56, № 7/2, с. 283 – 291.
- Москвичев В.В.. Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. Трещинностойкость и механические свойства конструкционных материалов. Новосибирск: Наука, 2002, 334 с.

#### References

 Ovcharenko V.E., Ivanov Yu.F., Yu Bao Hai. Effect of nanostructural surface modification of tribological properties of metal-ceramic alloy. Rare Metals, 2009, vol. 28, Spec. issue, pp. 678 – 682.

- Psakhie S.G., Ovcharenko V.E., Baohai Yu, Shilko E., Astafurov S., Ivanov Yu.F., Byeli A., Mokhovikov A. Influence of Features of Interphase Boundaries on Mechanical Properties and Fracture Pattern in Metal-Ceramic Composites. J. Mater. Sci. Technol., 2013, v. 29(11), p. 1025 – 1034.
- Ovcharenko V.E., Psakhie S.G., Ivanov Yu.F., Mokhovikov A.A. Zakonomernosti formirovaniya i vliyaniye mnogomasshtabnykh nanorazmernykh struktur na fizicheskiye svoystva poverkhnostnogo sloya tverdogo

splava [Laws of formation and the influence of multi-scale structures on the nanoscale physical properties of the surface layer of tungsten carbide]. *Izvestia VUZov. Fizika* — *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7/2, pp. 283 – 291.

4. Moskvichev V.V., Mahutov N.A., Cherniaev A.P. et al. *Treshchinnostoykost i mekhanicheskiye svoystva konstruktsionnykh materialov* [Crack resistance and mechanical properties of structural materials]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2002, 334 p.

Статья поступила в редакцию 26.10.2015 г.

Овчаренко Владимир Ефимович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4), доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, профессор-консультант Технологического института Национального исследовательского Томского политехнического университета (652055, Кемеровская область, г.Юрга, Ул. Ленинградская, 26), специалист в области разработки физических принципов и технологий создания композиционных структур и композиционных материалов. E-mail: ove45@mail.ru.

Иванов Юрий Федорович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3), доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, специалист в области физики конденсированного состояния. E-mail: yufi55@mail.ru

Иванов Константин Вениаминович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области микро- и наноструктур материалов. E-mail: ikv@ispms.tsc.ru

Моховиков Алексей Александрович — Технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета, г.Юрга Кемеровской области (652055, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, д. 26), кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, специалист в области металлообрабатывающего инструмента. E-mail: maa28@rambler.ru.

Сюй Юнь Хуа — Сианьский технологический университет (No.5, Southern, Jinhua Rd., Xi'an, Shaanxi, 710048, China), профессор, проректор по научной работе, специалист в области физики межфазного взаимодействия. E-mail: xuyunhua@vip.163.com.

**Ли Шен Чжун** — Сианьский технологический университет (No.5, Southern, Jinhua Rd., Xi'an, Shaanxi, 710048), China, доцент, специалист в области композиционных структур. E-mail: zhonglisheng1984@163.com.

**Юй Бао Хай** — Институт исследований металлов АН КНР(72 Wenhua Rd., Shenyang, 110016, China), доктор, старший научный сотрудник, специалист в области металлокерамических сплавов. E-mail: bhyu@imr.ac.cn.

# Modification cermet structure of the cemented carbide at a pulsed electron-ion-plasma irradiation

### V. E. Ovcharenko, Yu. F. Ivanov, A. A. Mohovikov, Yu Bao Hai, Xu Yun Hua, Lisheng Zhong

Was carred out a comparative analysis of structure-phase states, formed in the surface layer of the cemented carbide with high concentration of a ceramic component, which is irradiated by high-intensive pulse electron beam provided that a plasma-forming gas has various ionization energies and atomic masses, and forming structure-phase states influence on the cemented carbide surface layer resistance when metal cutting. Experimental data have shown that efficiency of pulsed electron-ion-plasma irradiation depends on ionization energy and atomic mass of a plasma-forming gas — while ionization energy falls and atomic mass of a plasma-forming gagent, accelerated dispersion of ceramic particles up to the nano-scale occurs. As the result of ceramic component nanostructuring in the surface layer, resistance of cemented carbide plates increases 1.5 times when metal cutting.

Key words: ceramic-metal structure, a pulsed electron-ion irradiation, plasma gas, ionization energy, atomic weight, ceramic components, nanostructuring

**Ovcharenko Vladimir** — Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS (2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russia), PhD, professor, head of laboratory. *E-mail:* ove45@mail.ru.

Ivanov Yuri — Institute of Heavy-Current Electronics of Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russia, PhD, senior research worker. E-mail: yufi55@mail.ru.

Ivanov Konstantin — Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS (2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russia), PhD, senior research worker. E-mail: ikv@ispms.tsc.ru.

**Mohovikov Alexei** — Yurga Technological Institute of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, PhD, head of department, e-mail: maa28@rambler.ru.

Xu Yunhua — Xi'an University of Technology (No.5, Southern, Jinhua Rd., Xi'an, Shaanxi, 710048, China), Professor, Vice-Rector, e-mail: xuyunhua@vip.163.com.

**Zhong, Lisheng** — Xi'an University of Technology (No.5, Southern, Jinhua Rd., Xi'an, Shaanxi, 710048, China), PhD. E-mail: zhonglisheng1984@163.com.

Yu Bao Hai — Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences (72 Wenhua Rd., Shenyang, 110016, China), PhD. E-mail: bhyu@imr.ac.cn.