

ТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОДБОРКА СТАТЕЙ
«НАНОСТРУКТУРНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»
(продолжение, начало в журнале № 4 – 2013)

УДК 669.14.08.29:621.785

В.Е. Овчаренко^{1,2}, А.А. Моховиков², А.С. Игнатьев²

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск)

² Технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета

**НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СПЛАВА
ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛА ***

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований наноструктурирования поверхностного слоя металлокерамического сплава карбид титана – никелевый сплав при импульсном электронно-пучковом облучении его поверхности. Приведены данные об особенностях наноструктурирования поверхностного слоя металлокерамического сплава при электронно-пучковом облучении в плазме газового разряда, содержащей аргон, аргон и азот, ксенон и азот, и их влияния на коэффициент трения на поверхности металлокерамического сплава и стойкость металлокерамических пластин при резании металла.

Ключевые слова: металлокерамический сплав, электронный пучок, импульсное облучение, поверхностный слой, наноструктура, коэффициент трения, резание металла.

**NANOSTRUCTURING A SURFACE LAYER AND ITS INFLUENCE
ON THE WEAR RESISTANT CHARACTERISTICS OF A SINTERED
ALLOY IN METALL CUTTING**

Abstract. The paper displays the results of experimental research of nanostructuring of a surface layer of titanium carbide – nickel sintered alloy at electron-beam exposure of its surface. Data on characteristics of nanostructuring of a surface layer of metal ceramic alloy exposed to electron beam of plasma gas discharge containing argon (argon and nitrogen) and (xenon and nitrogen) and their influence on friction coefficient on the surface of metal ceramic alloy and wear resistant properties of metal ceramic plates during cutting are given.

Keywords: cermet, electron-beam, pulse irradiation, subsurface layer, nanostructure, friction coefficient, cutting of metals.

Одним из определяющих направлений развития промышленного производства является организация системных фундаментальных и прикладных исследований в области создания новых прорывных технологий и новых материалов для машиностроения. Первоочередными задачами являются обоснование требований к материалам, эксплуатируемым в экстремальных условиях, и разработка новых технологий создания и модификации структуры и свойств материалов. Особое внимание должно уделяться разработке и созданию новых технологий производства металлообрабатывающего инструмента нового поколения, способного работать в экстремальных условиях эксплуатации, обрабатывать материалы с высокими физическими и прочностными свойствами.

Одним из перспективных направлений создания высокоресурсного металлообрабатывающего инструмента является разработка методов формирования вы-

сокопрочных наноструктурных состояний в поверхностных слоях инструмента и выбор оптимального структурно-фазового состояния поверхностных слоев для экстремальных условий эксплуатации инструмента.

Физический смысл влияния наноструктурных состояний на механические свойства поверхностного слоя металлокерамического сплава заключается в перераспределении упругой энергии за счет взаимодействия упругих полей структурных элементов на наномасштабном уровне, снижении масштабного уровня локализации пластической деформации, более равномерном распределении упругих напряжений при внешнем механическом и/или температурном воздействии. В результате в значительной степени повышается энергия зарождения критических концентраторов напряжения, снижается скорость роста трещин, возрастает работа разрушения и кратно повышается прочность материала.

Одним из перспективных методов формирования субмикро- и нанокристаллических структурно-фазовых состояний в поверхностных слоях материалов является использование низкоэнергетических интенсивных электронных пучков субмиллисекундной

* Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 2 и интеграционного проекта «СО РАН – НАНБ» № 5.

длительности, позволяющих контролируемо модифицировать поверхностные слои толщиной в десятки микрометров, практически не изменяя структурно-фазового состояния основного объема материалов [1]. По сравнению с широко распространенными лазерным, плазменным и ионным видами воздействия, электронно-пучковая технология обладает более гибкими возможностями контроля и регулирования количества подводимой энергии, отличается высокой локальностью воздействия и высоким коэффициентом полезного действия. Сверхвысокие (до 10^9 К/с) скорости нагрева до температур плавления и последующего охлаждения поверхностного слоя материала, формирование предельных (до $10^7 - 10^8$ К/м) градиентов температуры, обеспечивающих охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростью $10^4 - 10^9$ К/с, создают условия для управляемого формирования в поверхностных слоях облучаемых материалов субмикро- и нанокристаллических структурно-фазовых состояний.

Экспериментальные исследования были проведены на образцах из металлокерамического сплава на основе карбида титана TiC с никельхромовым Ni – Cr – Al связующим при соотношении объемов карбидной и металлической фаз 50:50. Нагрев поверхностного слоя металлокерамического сплава толщиной до 200 мкм со скоростью до 10^9 К/с с последующим охлаждением за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростью $10^4 - 10^9$ К/с осуществляли методом импульсного облучения образцов сплава электронным пучком diam. 10 – 20 мм [2].

Исследования микроструктур поверхности облучения и поверхностного слоя образцов металлокерамического сплава проводили методами сканирующей (SEM 515 «Philips») и просвечивающей микродифракционной (ЭМ-125) электронной микроскопии.

Анализ результатов количественных расчетов температурных полей в поверхностном слое металлокерамического сплава в зависимости от параметров импульсного электронно-пучкового облучения, проведенных для металлокерамического сплава, содержащего 50 % TiC, 50 % Ni – Cr – Al (по объему), позволил оценить диапазоны значений плотности энергии в электронном пучке, длительности τ и количества N импульсов облучения, обеспечивающие формирование в поверхностном слое металлокерамического сплава неравновесных структурно-фазовых состояний [3]. Основными критериями при оценке являлись глубина x прогрева металлокерамического сплава ($x = 100 \div 200$ мкм), температура нагрева поверхности в пределах одного импульса облучения (при минимальном градиенте температуры в нагреваемом слое до 3000 К). Указанным критериям соответствуют значения плотности энергии в электронном пучке $E_s = 40 \div 50$ Дж/см² при длительности τ импульсов 100 – 200 мкс. Необходимо учитывать, что температурный профиль прогрева поверхностного слоя,

формирующийся при первом импульсе облучения, практически не изменяется при увеличении числа импульсов облучения. Изменение количества импульсов облучения позволяет регулировать продолжительность межфазного взаимодействия компонентов металлокерамической композиции в неравновесных температурно-временных условиях при заданных значениях плотности энергии в электронном пучке и длительности импульсов облучения.

Импульсное электронно-пучковое облучение металлокерамического сплава по мере увеличения плотности мощности облучения его поверхности сопровождается разрушением крупных частиц карбида и частичным растворением карбидных частиц в расплаве металлического связующего (рис. 1, а). При плотности мощности электронного пучка $W_s = (8 \div 10) \cdot 10^5$ Вт/см² в металлическом связующем металлокерамического сплава образуется новая структурная составляющая – наноразмерные частицы вторичного карбида, образовавшиеся путем выделения из пересыщенного углеродом и титаном твердого раствора на основе никелевого сплава (рис. 1, б). В распределении наноразмерных частиц вторичного карбида в прослойках металлического связующего выявлена следующая закономерность: наночастицы карбида титана распределены на границах ячеек кристаллизации металлического связующего размером 100 – 150 нм.

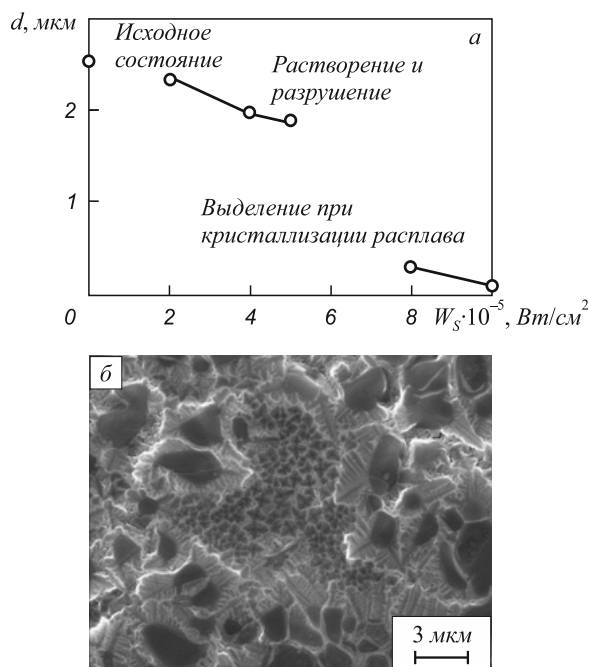


Рис. 1. Последовательность модификации структуры поверхностного слоя металлокерамического сплава и изменение размера частиц карбида в сплаве при импульсном электронно-пучковом облучении в зависимости от плотности облучения поверхности сплава (а) и микроструктура поверхностного слоя после электронно-пучкового облучения при плотности энергии в электронном пучке $W_s = 40$ Дж/см², $N = 15$ имп., частоте следования импульсов 1 с^{-1} при длительности импульсов облучения 200 мкс (сканирующая электронная микроскопия) (б)

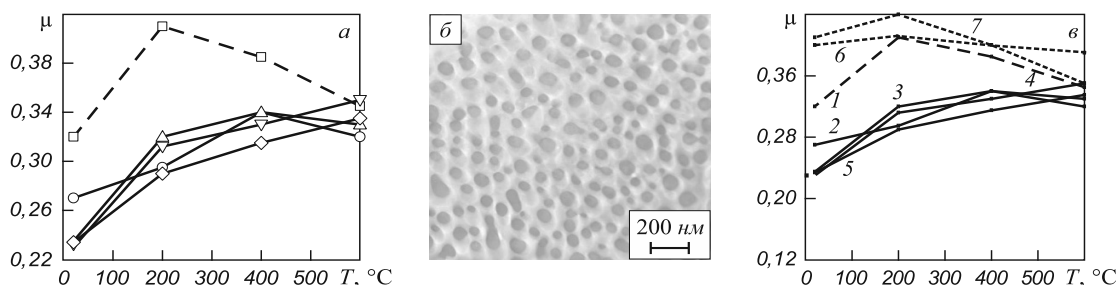


Рис. 2. Зависимость (а) коэффициента трения на поверхности металлокерамического сплава от температуры испытания в исходном состоянии сплава (---) и после электронно-импульсного облучения (—) при длительности импульсов облучения 50 мкс (○), 100 мкс (△), 150 мкс (▽), 200 мкс (◇); электронно-микроскопическое изображение структуры межчастичных прослоек металлического связующего в поверхностном слое металлокерамического сплава после электронно-пучкового облучения в азотсодержащей плазме (б); зависимость (в) коэффициента трения на поверхности металлокерамического сплава от температуры испытания в исходном состоянии сплава (---) и после облучения в аргонсодержащей (—) и азотсодержащей (.....) плазме газового разряда: 2 – $\tau = 50$ мкс, $E = 40$ Дж/см²; 3 – $\tau = 100$ мкс, $E = 40$ Дж/см²; 4 – $\tau = 150$ мкс, $E = 40$ Дж/см²; 5 – $\tau = 200$ мкс, $E = 40$ Дж/см²; 6 – $\tau = 150$ мкс, $E = 50$ Дж/см²; 7 – $\tau = 150$ мкс, $E = 70$ Дж/см²

Одним из основных показателей свойств поверхностного слоя с модифицированным структурно-фазовым состоянием является термическая стабильность физических свойств поверхностного слоя и, прежде всего, коэффициента трения (μ). На рис. 2, а приведены температурные зависимости коэффициента трения по поверхности металлокерамического сплава в исходном состоянии и после импульсного электронно-пучкового облучения при различной длительности импульсов. При комнатной температуре наноструктурирование металлического связующего в поверхностном слое заметно снижает коэффициент трения по поверхности металлокерамического сплава, но с повышением температуры коэффициент трения увеличивается и при температуре 600 °C становится сравнимым с коэффициентом трения по поверхности металлокерамического сплава в исходном состоянии. Последнее, очевидно, обусловлено термоактивируемой деструкцией структурно-неравновесного состояния поверхностного слоя металлокерамического сплава.

Повышение термической стабильности структурно-неравновесного состояния поверхностного слоя металлокерамического сплава возможно путем образования на внутрифазных границах раздела модифицированной структуры поверхностного слоя выделений наночастиц тугоплавких химических соединений. Как показано в работе [4], за время одиночного импульса облучения в поверхностном слое металлокерамического сплава возможно образование диффузионной зоны азота с содержанием до 1,5–2,0 % N (ат.). Анализ структуры и фазового состояния поверхностного слоя после облучения в азотсодержащей плазме газового разряда показал, что азотирование в плазме газового разряда сопровождается образованием в металлическом связующем регулярно распределенных в межчастичных прослойках металлического связующего частиц нитрида алюминия AlN размерами приблизительно 50 нм (рис. 2, б). В результате после облучения в азотсодержащей плазме (при плотности энергии в электронном пучке 50 Дж/см²)

коэффициент трения по поверхности металлокерамического сплава практически не зависит от температуры вплоть до 600 °C (рис. 2, в, зависимость б).

Представленные выше результаты относятся к наноструктурированию в поверхностном слое металлокерамического сплава металлического связующего. На основе исследования влияния энергии ионизации плазмообразующего газа на механизм модификации структуры и фазового состояния поверхностного слоя металлокерамического сплава установлено, что замена аргона на криптон и ксенон позволяет эффективно наноструктурировать и карбидную компоненту металлокерамического сплава. На рис. 3, а представлена

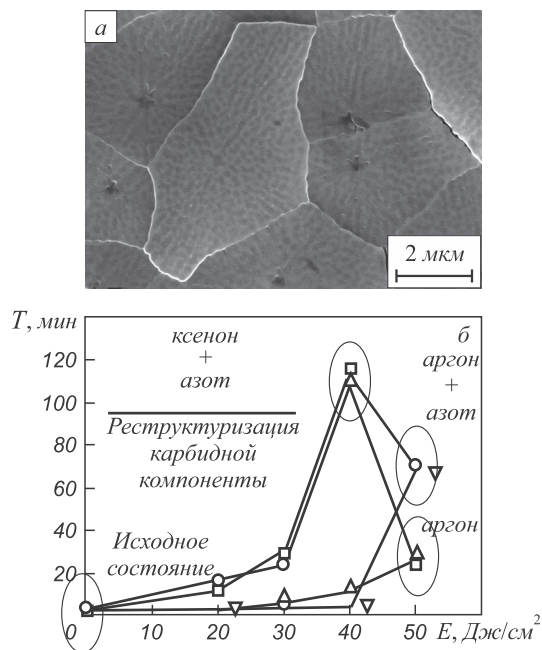


Рис. 3. Микроструктура поверхности металлокерамического сплава после облучения в плазме газового разряда, содержащей ксенон и азот (а) и зависимости временной стойкости T пластин из металлокерамического сплава TiC – (Ni – Cr – Al) при резании стали Ст40 после импульсного электронно-пучкового облучения в плазме газового разряда, содержащей аргон, аргон и азот, ксенон и азот (б)

микроструктура поверхности металлокерамического сплава после импульсного электронно-пучкового облучения в плазме газового разряда, содержащей ксенон и азот, на рис. 3, б показано влияние режимов и условий импульсного электронно-пучкового облучения на стойкость металлокерамической пластины при резании металла. Можно констатировать, что при облучении в аргонсодержащей плазме газового разряда в результате измельчения металлокерамической структуры сплава и образования наноразмерной карбидной составляющей снижается коэффициент трения на поверхности сплава и повышается его стойкость при резании металла (до шести раз). При облучении сплава в азотсодержащей плазме в результате образования в металлическом связующем поверхностного слоя нанодисперсного нитрида алюминия стойкость металлокерамического сплава при резании металла повышается в 10 – 12 раз. При переходе к облучению в плазме газового разряда, содержащей ксенон и азот, в результате реструктуризации в поверхностном слое карбидной компоненты коэффициент трения становится практически независимым от температуры испытания, а стойкость сплава при резании металла повышается в 20 и более раз.

Выводы. Наноструктурирование металлического связующего в поверхностном слое металлокерамического сплава при импульсном электронно-пучковом облучении в аргонсодержащей плазме газового разряда путем образования нанодисперсного вторичного карбида титана снижает коэффициент трения по поверхности сплава

и кратно (до шести раз) повышает стойкость металлокерамики при резании металла. Облучение металлокерамического сплава в азотсодержащей плазме газового разряда дополнительно образует в металлическом связующем нанодисперсные (до 50 нм) частицы нитрида алюминия, стабилизирующие наноструктурированное состояние металлического связующего при повышенных температурах, и повышает временную стойкость металлокерамики при резании металла в 10 – 12 раз. Наноструктурирование металлического связующего при одновременной реструктуризации карбидной компоненты в поверхностном слое металлокерамического сплава при облучении в плазме газового разряда, содержащей ксенон и азот, в виде распада исходных частиц карбида титана на наноразмерные (до 50 нм) составляющие повышает стойкость металлокерамической пластины при резании металла в 20 и более раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Псахье С.Г., Овчаренко В.Е., Князева А.Г., Шилько Е.В. // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 6. С. 23 – 34.
2. Коваль Н.Н., Девятков В.Н., Щанин П.М. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 1. С. 135 – 140.
3. Овчаренко В.Е., Лапшин О.В. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 5. С. 33 – 37.
4. Букрина Н.В., Князева А.Г., Овчаренко В.Е. // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 1. С. 55 – 60.

© 2013 г. В.Е. Овчаренко, А.А. Моховиков,
А.С. Игнатьев
Поступила 30 ноября 2012 г.