УДК 621.785:669.14.08.29

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА, НАНОСТРУКТУРНОЙ МОДИФИКАЦИИ И УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СПЛАВА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОМ ОБЛУЧЕНИИ

В.Е. Овчаренко, Ю.Ф. Иванов*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск Юргинский технологический институт (филиал) ТПУ E-mail: ove45@mail.ru

Представлены результаты исследования влияния импульсного электронно-пучкового облучения поверхности металлокерамического сплава на основе карбида титана с никельхромовой связкой на температурный профиль зоны прогрева сплава с поверхности его облучения, на микроструктуру поверхностного слоя и стойкость металлокерамического сплава в режиме резания металла. Показано, что электронно-пучковое облучение металлокерамического сплава формирует в поверхностном слое структурно-неравновесные состояния компонентов металлокерамической композиции. Переход металлического связующего в наноструктурное состояние, наряду с другими факторами модификации микроструктуры металлокерамического сплава, определяет кратное повышение стойкости металлокерамического сплава в режиме резания металла.

Ключевые слова:

Физика конденсированного состояния, межфазное взаимодействие, композиционные материалы, структурно-неравновесные состояния, наноструктура, дефектная субструктура, фазовые превращения, модификация.

Повышение ресурса работы металлокерамических (твердых) сплавов в экстремальных условиях эксплуатации относится к актуальным задачам современного материаловедения. Принципиально новым решением указанной задачи является создание в поверхностном слое металлокерамических сплавов структурно-неравновесных состояний в процессе их импульсного электронно-пучкового облучения [1-4], при котором происходит высокоскоростной нагрев (до 106 град/с) поверхностного слоя сплава до аномально высоких температур с последующим высокоскоростным (10⁴...10⁹ град/с) охлаждением. Высокоскоростное термоциклирование сопровождается процессами межфазного взаимодействия компонентов металлокерамической композиции по неравновесным диаграммам состояния и формированием структурно-неравновесных состояний.

Основными параметрами электронно-пучкового облучения материалов, определяющими температурные профили зоны прогрева поверхностного слоя, и, соответственно, характер и кинетику структурно-фазовых превращений, являются плотность энергии в электронном пучке, длительность, количество и частота импульсов облучения. В настоящей работе приведены результаты исследования влияния указанных параметров облучения металлокерамического сплава на основе карбида титана с никельхромовой связкой (50:50) на микроструктуру поверхностного слоя и его стойкость в режиме резания металла.

Численные расчеты температурного профиля нагрева поверхностного слоя твердого тела в процессе облучения его поверхности высокоэнергетическими пучками достаточно большого диаметра возможны с высокой степенью достоверности в рамках одномерного приближения [5]. Рассмотрим образец металлокерамического сплава в виде цилиндра (радиусом r и длиной X). Облучение образца производится с торцовой поверхности при плотности энергии в электронном пучке E_s . Обозначим: t_i – время действия импульса электронного облучения, t_0 – временной интервал между импульсами облучения. Связь между величинами t_i и t_0 через частоту импульсов v выразится следующим образом:

$$t_0 = \frac{1 - v t_i}{v}.$$

Полагаем, что распределение плотности энергии на поперечном сечении электронного пучка является однородным. В этом случае нагрев образца электронным пучком в одномерном приближении можно описать уравнением теплопроводности [6]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\chi}{x_0} (T - T_0) - \frac{\delta}{x_0} (T^4 - T_0^4), \ 0 \le x \le X,$$

где T – температура; t – время; , λ – в общем случае зависящие от температуры теплоемкость и теплопроводность образца в твердом состоянии; ρ – плотность образца; χ – коэффициент конвективной теплоотдачи; δ – коэффициент теплоотдачи излучением; T_0 – температура окружающей среды; x – продольная координата.

Эффективные величины теплоемкости, теплопроводности и плотности металлокерамического образца представим в следующем виде:

$$c = v_{\text{NiCr}} c_{\text{NiCr}} + v_{\text{TiC}} c_{\text{TiC}}, \quad l = v_{\text{NiCr}} l_{\text{NiCr}} + v_{\text{TiC}} l_{\text{TiC}},$$
$$\rho = v_{\text{NiCr}} \rho_{\text{NiCr}} + v_{\text{TiC}} \rho_{\text{TiC}}.$$

где c_j , λ_j , ρ_j , v_j — теплоемкость, теплопроводность, плотность и относительная массовая доля *j*-го компонента в металлокерамическом сплаве (в данном случае никельхромовой связки или карбида титана).

Для граничных условий можно записать: x=0:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} E_s / t_i > 0, t \in [(n-1)(t_i + t_0), (n-1)t_0 + nt_i] \\ 0, t \notin [(n-1)(t_i + t_0), (n-1)t_0 + nt_i] \end{cases},$$

где *n* – количество импульсов;

$$x = X: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0.$$

Количественные расчеты были проведены в приближении постоянства теплоемкости и теплопроводности металлокерамического материала. Исходные данные [7, 8]: $c_{\text{NiCr}}=452 \text{ Дж/(кг-K)};$ $c_{\text{TiC}}=408 \text{ Дж/(кг-K)};$ $\lambda_{\text{NiCr}}=88,5 \text{ Дж/(с-K-M)};$ $\lambda_{\text{TiC}}=42 \text{ Дж/(с-K-M)};$ $\rho_{\text{NiCr}}=8800 \text{ кг/M}^3;$ $v_{\text{NiCr}}=v_{\text{TiC}}=0,5;$ $\chi=10 \text{ Дж/(с-K-M^2)};$ $\delta=3\cdot10^{-7} \text{ Дж/(с-K^4-M^2)};$ $T_0=300 \text{ K};$ r=0,01 м; x=0,001 м.

На рис. 1 представлены температурные профили нагрева поверхностного слоя металлокерамического образца на момент окончания одиночного импульса электронного облучения в зависимости от длительности импульса облучения при постоянной плотности энергии в электронном пучке. Увеличение длительности импульса электронного облучения приводит к значительному снижению температуры разогрева облучаемой поверхности при заметном увеличении глубины прогрева металлокерамики (рис. 1, *a*). Увеличение длительности импульса с 5 до 50 мкс приводит к снижению температуры нагрева поверхности почти в 3 раза и в 4 раза при увеличении длительности импульса облучения до 200 мкс. При этом существенно увеличивается глубина прогрева образца с поверхности облучения (от 60 мкм при длительности импульса 50 мкс до 300 мкм при длительности импульса 200 мкс).

Повышение плотности энергии в электронном пучке с 5 до 10 Дж/см² приводит к повышению температуры нагрева облучаемой поверхности с 760 до 1250 К (рис. 1, *a*), а дальнейшее увеличение плотности энергии в электронном пучке до 40 Дж/см² повышает температуру нагрева облучаемой поверхности до 4250 К (рис. 1, δ). Повышение плотности энергии в электронном пучке приводит и к существенному увеличению глубины прогрева металлокерамики от поверхности облучения в глубину образца (рис. 2). Увеличение числа импульсов облу-



Рис. 1. Температурные профили прогрева поверхностного слоя металлокерамического сплава при облучении его поверхности одиночным электронным импульсом с плотностью энергии в пучке 5 Дж/см² при различной длительности импульса облучения: 1) 5, 2) 50 и 3) 200 мкс (а) и при различной плотности энергии в электронном пучке: 1) 5, 2) 10, 3) 40 Дж/см² при длительности импульса 50 мкс (б)



Рис. 2. Зависимости глубины зоны прогрева металлокерамического сплава от поверхности облучения до температуры 1500 К от длительности (а) и количества (б) импульсов облучения при различных значениях плотности энергии в электронном пучке: 1) 20, 2) 40, 3) 50 Дж/см² – 1 импульс облучения; 1') 20, 2') 40, 3') 50 Дж/см² – 300 импульсов облучения (а); 1) 20, 2) 40, 3) 50 Дж/см² при длительности импульсов 100 мкс (б)

чения также увеличивает глубину прогрева металлокерамического сплава, но для каждого значения плотности энергии в электронном пучке существует предельная величина зоны прогрева металлокерамического сплава со стороны облучаемой поверхности (рис. 2, δ).

Увеличение числа и частоты импульсов электронного облучения металлокерамического сплава практически не влияет на температурный профиль нагрева его приповерхностного слоя (рис. 3). Последнее означает, что температурный профиль прогрева приповерхностного слоя металлокерамики формируется при первом импульсе ее облучения, а количество импульсов облучения определяет время нахождения приповерхностного слоя облучаемого материала в структурно-неравновесном состоянии.

Анализ представленных на рис. 1–3 температурных профилей позволяет оценить диапазоны значений плотности энергии в электронном пучке, длительности и количества импульсов облучения, в пределах которых целесообразно проведение экспериментальных исследований по модификации структуры поверхностного слоя металлокерамического сплава при электронно-импульсном облучении. Основными критериями при проведении указанных оценок являются: глубина прогрева металлокерамического сплава x=100...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 $E_{\rm s}=40...50$ Дж/см² при длительности импульсов t_i =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.

Микроструктуру изломов поперечного сечения поверхностного слоя образцов металлокерамического сплава исследовали на электронном сканирующем микроскопе SEM-515 «Philips»; фазовый состав и дефектную субструктуру изучали методом дифракционной электронной микроскопии (прибор ЭМ-125).

Установлено, что электронно-импульсное облучение поверхности металлокерамического сплава приводит к образованию непосредственно на поверхности слоя стекловидной структуры. С увеличением длительности импульсов от 50 до 200 мкс толщина стекловидного слоя уменьшается практически до нуля. Другими словами, увеличение длительности импульсов облучения, приводя к увеличению глубины прогрева металлокерамики при одновременном снижении температуры нагрева ее поверхности, снижает интенсивность переплава металлокерамической композиционной структуры, рис. 4.

Толщина стекловидного слоя на поверхности металлокерамического сплава с увеличением длительности импульсов электронно-пучкового облучения уменьшается и при длительности импульсов 200 мкс практически сходит на нет (рис. 5, кривая 1). Ниже стекловидного слоя формируется структура дисперсного строения «карбидные частицы с металлической связкой», отличающейся от структуры исходного (до облучения) металлокерамического сплава тем, что металлическая связка находится в наноструктурном состоянии. Последнее образуется путем выделения наноразмерных (60...75 нм) частиц карбида титана и алюминида титана Al_2Ti (рис. 6, *a*), формированием ультрамелких ячеек кристаллизации, разделенных нанопрослойками карбида титана, и образованием ячеистой и ячеисто-сетчатой дислокационной субструктуры (рис. 6, б). Толщина поверхностного слоя с указанной структурой увеличивается с увеличением длительности импульсов облучения (рис. 5, кривая 2).



Рис. 3. Температурные профили нагрева поверхностного слоя металлокерамического сплава в зависимости от числа импульсов электронного облучения: 1) 1, 2) 15, 3) 50 импульсов (частота – 1 имп./с) (а) и от частоты импульсов: 1) 1, 2) 10, 3) 20, 4) 100, 5) 200, 6) 300 имп./с (б). Плотность энергии в электронном пучке – 40 Дж/см², длительность импульсов – 5 мкс



Рис. 4. Микроструктуры изломов пластин из металлокерамического сплава после электронно-импульсного облучения (40 Дж/см², 15 импульсов) импульсами длительностью: а) 50, б) 100, в) 150 и г) 200 мкс, частота следования импульсов ~0,3 Гц



Рис. 5. Зависимости толщин стекловидного слоя (кривая 1) и слоя металлокерамической структуры дисперсного строения с металлической связкой в наноструктурном состоянии (кривая 2) от длительности импульсов электронно-пучкового облучения

Электронно-пучковое облучение поверхности металлокерамического сплава в значительной мере (до 10 раз) уменьшает шероховатость поверхности металлокерамического сплава (рис. 7, *a*) и кратно повышает стойкость металлокерамического сплава в режиме резания металла (рис. 7, δ).

Таким образом, в процессе электронно-импульсного облучения металлокерамического сплава в его поверхностном слое формируется зона нагрева, температурный профиль которого с поверхности в объем материала в значительной мере определяется параметрами электронно-импульсного облучения. Оптимизация величин параметров электронно-импульсного облучения, на основе расчетных и экспериментальных данных, позволя-



Рис. 6. Микроструктура металлического связующего в поверхностном слое твердого сплаве после его электронно-импульсного облучения импульсами длительностью 200 мкс (40 Дж/см², 15 импульсов, частота следования импульсов 0,3 Гц). Просвечивающая электронная микроскопия: а) светлое, б) темное поле

ет формировать в поверхностном слое модифицированную структуру металлокерамического сплава, в значительной мере влияющей на стойкость сплава в условиях резания металла. Повышение стойкости сплава (более чем в три раза) наблюдается при формировании в поверхностном слое микроструктуры дисперсного строения из карбидных частиц со сниженным уровнем дефектности (в результате растрескивания частиц по дефектам их строения и залечивания дефектов расплавом связующего) и металлической связки в наноструктурном состоянии. Переход металлической связки металлокерамического сплава в наноструктурное состояние определяет смену механизма хрупкого разрушения



Рис. 7. Зависимости шероховатости поверхности от количества импульсов электронно-пучкового облучения (плотность энергии в пучке 15,0 Дж/см²) (а) и величины пути резания металла до критической степени износа передней режущей кромки металлокерамической пластины (0,2 мм) от длительности импульсов облучения (плотность энергии в пучке 40 Дж/см², 15 импульсов)

поверхностного слоя сплава на вязкое разрушение. Последнее, в сочетании со снижением дефектности карбидных частиц и увеличением прочности их связи с металлической связкой, приводит к крат-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Колобова Е.Г. Электронная обработка безвольфрамовой металлокерамики. І. Влияние на микроструктуру поверхности и стойкость в режиме резания // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 5. – С. 17–20.
- Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Лапшин О.В. Электронная обработка безвольфрамовой металлокерамики. П. Структурные превращения в поверхностном слое // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 1. – С. 31–34.
- Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Лапшин О.В., Колобова Е.Г. Модификация металлокерамического сплава электронно-импульсной обработкой его поверхности // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 27–32.
- Ovcharenko V.E., Psakhie S.G., Savitskii A.P. Influence of Electronic Radiation on Resistance to Wear of TiC-NiCr Hard Alloy at Cut-

ному повышению стойкости металлокерамического сплава в режиме резания металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 07-08-00209-а, 08-08-99076-р_офи).

ting Steel // EURO PM 2005 Congress and Exhibition in Prague: Proceedings. – 2005. – V. 3. – P. 267–273.

- Solonenko O.P., Golovin A.A. Computer simulation of heat transfer and phase state under high-energy flux impact on solid body surface // Proc. of ITSC'05, 2–4 May 2005, Bazel, Switzerland. – Bazel, 2005. – P. 6–10.
- Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
- Смитлз К.Дж. Металлы. Справочник. М.: Металлургия, 1980. – 446 с.
- Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 556 с.

Поступила 23.04.2008 г.