

УДК 539.2/.6 : 539/.04

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ

© 2013 г. **Г. А. Блейхер, В. П. Кривобоков**

Физико-технический институт Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИТПУ)

Г. А. Блейхер – докт. физ.-мат. наук, доцент кафедры водородной энергетики и плазменных технологий НИТПУ, ст. науч. сотр. лаборатории № 23 (634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30). E-mail: bga@tpu.ru.

В. П. Кривобоков – докт. физ.-мат. наук, проф., заведующий той же кафедрой. E-mail: krivobokov@tpu.ru.

Исследованы зависимости коэффициентов эрозии поверхности металлов от параметров мощных импульсных пучков заряженных частиц с использованием математического моделирования процессов диссипации их энергии в твердом теле. Построен баланс энергии на поверхности мишени для пучков с начальной энергией частиц от 10 до 1000 кэВ и плотностью мощности до 10^{10} Вт/см². Изучена энергоэффективность удаления атомов с поверхности металлов в зависимости от вида частиц пучка, их начальной энергии, плотности мощности и длительности импульса тока.

Ключевые слова: мощные импульсные пучки ионов и электронов, эрозия поверхности, испарение, математическое моделирование.

The dependences of metal surface erosion factors on the parameters of powerful impulse charged particle beams has been investigated with the use of mathematical simulation of dissipation processes of their energy in solid body. The energy balance over the target surface for beams with initial particle energy from 10 to 1000 keV and power density up to 10^{10} W/cm² has been plotted. Power efficiency of atom removal away from the metal surface has been studied depending on the type particles, their initial energy, power density, and current impulse duration.

Key words: powerful impulse beams of ions and electrons, surface erosion, evaporation, mathematical simulation.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мощные импульсные пучки (МИП) заряженных частиц с начальной энергией $E_0 = 10 \div 1000$ кэВ и плотностью мощности $P = 10^6 \div 10^9$ Вт/см² активно используются для модифицирования поверхности твердого тела. При этом способность МИП удалять вещество с облучаемой поверхности, т. е. вызывать ее эрозию, представляет большой интерес для исследователей и создателей различных технологий обработки материалов [1–5].

Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что природа эрозии поверхности под действием МИП ионов и электронов связана с сильным радиационным разогревом, вызываемым тормозящимися частицами, что приводит к испарению поверхности мишени [1–3]. Установлено, что интенсивность эрозии, индикатором которой является коэффициент эрозии (т. е. количество атомов, удаленных с поверхности твердого тела, отнесенное к количеству частиц пучка), на несколько порядков выше интенсивности столкновительного распыления поверхности твердого тела при непрерыв-

ном облучении умеренными по плотности тока ($J < 0,1$ А/см²) ионными пучками с аналогичными значениями E_0 [6–9]. Причем скорость эмиссии атомов с облучаемой поверхности мишени нелинейно растет с увеличением плотности тока, так как скорость испарения имеет практически экспоненциальную зависимость от температуры поверхности [6].

Импульсный характер облучения позволяет существенно уменьшить сток энергии за счет теплопроводности из области торможения частиц в веществе по сравнению с пучками непрерывного действия. Поэтому доля энергии пучка, затрачиваемая на испарение атомов с облучаемой поверхности, т. е. энергоэффективность эрозии, должна быть существенно выше. Это обстоятельство является одним из преимуществ МИП заряженных частиц в ряде технологических применений.

Для эффективного использования подобных пучков в научных исследованиях и технологиях необходимо выявить зависимость свойств эрозии, в частности интенсивности и энергоэффективности удаления атомов с поверхности, от па-

раметров облучения и систематизировать пучки по их способности осуществлять эрозию.

Мы предприняли изучение свойств эрозии поверхности твердого тела под действием МИП ионов и электронов, используя математическое моделирование процессов диссипации их энергии в веществе. В настоящей статье представлены некоторые результаты наших исследований, которые позволяют судить о влиянии параметров пучков (природы частиц, их начальной энергии, плотности мощности и плотности энергии пучков, длительности импульса тока) на интенсивность и энергоэффективность эрозии. Они могут быть полезными при решении задач, связанных с прогнозированием последствий воздействия МИП на материалы и оптимизацией их параметров для различных технологий модифицирования поверхностных свойств твердых тел.

Параметры пучков, выбранные для исследования, охватывают диапазон, освоенный производителями ускорительной техники применительно к решению технологических задач, связанных с модифицированием свойств поверхности материалов и изделий. Плотность мощности пучков (среднее значение в импульсе) находится в интервале $P = 10^6 \div 10^{10}$ Вт/см², начальная энергия ионов и электронов $E_0 = 100 \div 1000$ кэВ, длительность импульса тока $\tau = 10^{-8} \div 10^{-6}$ с. Площадь следа пучка на бомбардируемой поверхности составляет несколько десятков квадратных сантиметров.

МЕХАНИЗМЫ ЭРОЗИИ И ИХ МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Анализ опубликованных результатов экспериментов по определению структуры эрозионного потока с поверхности мишени под действием МИП заряженных частиц приводит к выводу о том, что его частицы можно разделить на 2 группы. Одна из них включает в себя атомы, молекулы, ионы, радикалы и т. п., другая – объединяет субмикро- и микрогазовые частицы конденсированной фазы, такие как кластеры, капли и т. п.

Частицы первой группы присутствуют всегда, и механизмы их появления в эрозионном потоке обусловлены, главным образом, процессами пере-

хода конденсированного вещества в пар. В случае ионных пучков еще имеются атомные частицы, эмитированные с поверхности за счет распыления, но их доля незначительна на общем фоне испаренных частиц [7].

Причины появления в эрозионном потоке частиц второй группы более многообразны. Они определяются многими факторами механизмов энергообмена в системе «пучок – мишень» и пока систематически не исследованы. Поскольку их количество обычно невелико, то для выявления наиболее общих закономерностей эрозии, присутствующих широкому кругу материалов и режимов облучения, моделирование эрозии было выполнено без их учета.

Разработанная нами модель эрозии поверхности твердого тела под действием мощных субмикро- и микросекундных пучков заряженных частиц с начальной энергией в диапазоне от 10 до 1000 кэВ предполагает, что поток продуктов эрозии с облучаемой поверхности создается в результате перехода атомов (молекул) конденсированного вещества в паровую фазу. При плотности мощности от 10^6 до 10^9 Вт/см², как правило, имеет место поверхностное испарение, которое при $P > 10^9$ Вт/см² переходит в гидродинамический разлет паров. Структура этой модели подробно описана нами в работах [7, 8].

В случае МИП ионов коэффициент эрозии (D) складывается из двух независимых компонентов: распылительного (коэффициент распыления) и испарительного (коэффициент эрозии за счет испарения). Но так как в исследуемом диапазоне параметров пучков распыленные атомы составляют не более 1 % в эрозионном потоке [7], то можно считать, что коэффициент эрозии определяется испарением. В случае электронных пучков величина D формируется только за счет испарения.

Для расчета коэффициента D было использовано следующее соотношение:

$$D = Z_{ev} n \int_0^{\tau} j(t) dt. \quad (1)$$

Здесь n – ядерная плотность вещества мишени; e – заряд электрона; $j(t)$ – функция изменения плотности тока во времени t в течение импульса длительностью τ ; Z_{ev} – толщина испарившегося слоя, которая для пучков умеренной интенсивности

вычислялась по двухфазной модели испарения, а в случае высокоинтенсивных – по гидродинамической [6–8].

В настоящей статье приведены результаты, полученные на примере металлов. Однако, поскольку в основу модельного представления положены фундаментальные законы диссипации энергии пучка в веществе, обнаруженные свойства эрозии в качественном отношении имеют аналогичный вид и для других видов материалов.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ ЭРОЗИИ

Исследования показали, что эрозионные процессы на поверхности твердого тела под действием МИП ионов и электронов определяются совокупностью их параметров, влияющих на пространственно-временное распределение объемной мощности энерговыделения по глубине мишени. Особое значение имеет пространственное распределение линейных потерь энергии тормозящихся частиц пучка по глубине мишени $G(z)$ (ось OZ – нормаль к поверхности мишени).

На рис. 1 показаны типичные конфигурации этой функции для ионов, протонов и электронов разных энергий на примере облучения меди. Они разные не только в количественном, но и в качественном отношении. Во-первых, линейные потери энергии электронов в приповерхностной

области мишени примерно на 1–2 порядка ниже, чем ионов с той же начальной энергией частиц. Во-вторых, глубина их проникновения в вещество примерно во столько же раз больше. В-третьих, в отличие от ионов тяжелых и средних масс, максимум энерговыделения электронов находится не на самой поверхности, а на некотором расстоянии от нее – в глубине облучаемого материала. Поэтому, хотя закономерности изменения интенсивности и энергоэффективности эрозии от параметров импульсных пучков электронов и ионов в качественном отношении совпадают, в количественном выражении их показатели могут отличаться на порядки.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов эрозии поверхности медной мишени от плотности мощности и плотности энергии МИП заряженных частиц. В данном случае коэффициенты эрозии металлов под действием ионных и электронных пучков субмикросекундной длительности с $E_0 = 100 \div 1000$ кэВ могут достигать значений от 10^4 до 10^5 атом/частица. Причем увеличение P сначала приводит к росту D , но затем, после достижения максимума, наблюдается спад функции $D(P)$. Причины этого могут быть различными для разных видов пучков. В случае ионов и низкоэнергетических ($E_0 < 100$ кэВ) электронов это может быть вызвано возрастанием потерь энергии пучка в парах, экранирующих мишень в течение облучения, так как для таких пучков испарение поч-

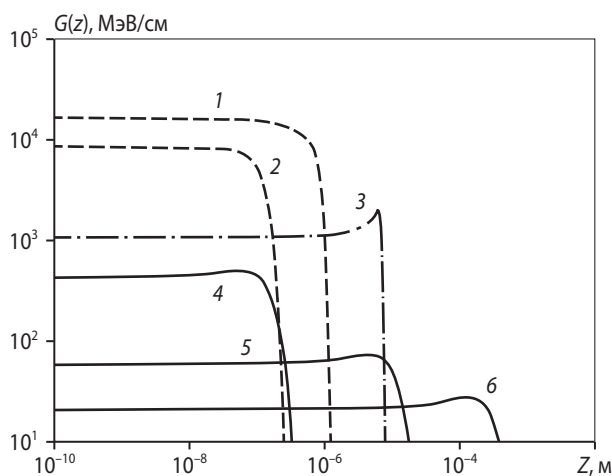


Рис. 1. Пространственное распределение линейных потерь энергии заряженных частиц в меди
1–2 – ионы углерода с $E_0 = 1$ МэВ (1) и 100 кэВ (2);
3 – протоны с $E_0 = 1$ МэВ;
4–6 – электроны с $E_0 = 10$ кэВ (4), 100 кэВ (5) и 1 МэВ (6)

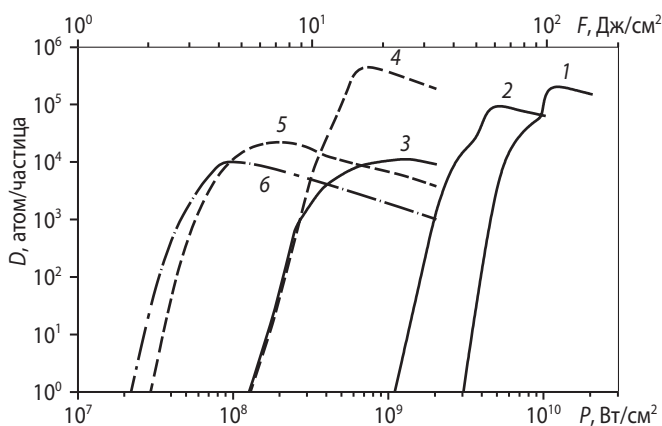


Рис. 2. Коэффициенты эрозии поверхности меди в зависимости от плотности мощности и плотности энергии МИП при длительности импульса тока 100 нс
1–3 – электроны с $E_0 = 1$ МэВ (1), 500 кэВ (2) и 100 кэВ (3);
4, 5 – протоны с $E_0 = 2$ МэВ (4) и 300 кэВ (5);
6 – ионы углерода с $E_0 = 300$ кэВ

ти полностью происходит в течение действия импульса тока. В случае высокоэнергетических электронов ($E_0 > 100$ кэВ), из-за особенностей потерь их энергии в веществе, испарение начинается почти в самом конце импульса. Но здесь при достаточно высокой плотности мощности пучка большая доля его энергии расходуется на увеличение упругой составляющей внутренней энергии облучаемого вещества и кинетической энергии паров. Поэтому в зависимости $D(P)$ тоже имеется максимум.

Результаты, представленные на рис. 2, демонстрируют тот факт, что эрозия в импульсном режиме воздействия является пороговым процессом по плотности мощности пучка. Преодоление порога связано с появлением заметного испарения. Значение P , которое можно считать пороговым, зависит от вида частиц, их начальной энергии, а также развертки во времени и длительности импульса тока. Общая для всех частиц закономерность – чем глубже проникают частицы пучка в вещество, тем выше значение пороговой плотности мощности.

Величина максимального значения коэффициента эрозии индивидуальна в разных режимах облучения, т. е. для любой комбинации «тип частиц – их начальная энергия – длительность импульса тока – вещество мишени» характерен свой максимальный коэффициент эрозии ($D_{\max}$), которому свойственно специфическое значение плотности тока ($J_{D_{\max}}$). И нет смысла его наращивать больше, так как вся дополнительная энергия будет поглощаться парами облучаемого материала.

Для любой комбинации «тип частиц – их начальная энергия – длительность импульса тока – вещество мишени» величина $D_{\max}$ тем больше, чем выше E_0 . В целом чем глубже частицы пучка проникают в вещество, тем больше максимальный коэффициент эрозии (см. рис. 2).

Для большинства металлов при $E_0 \leq 100$ кэВ максимальные коэффициенты эрозии не превышают 10^3 атом/частица. С увеличением E_0 значения $D_{\max}$ возрастают. В интервале $E_0 = 100 \div 1000$ кэВ значения $D_{\max}$ находятся в диапазоне $10^4 \div 10^5$ атом/частица.

На рис. 3 показаны максимальные коэффициенты эрозии поверхности меди ($D_{\max}$) и соответствующие им значения плотности энергии пучка ($F_{D_{\max}}$)

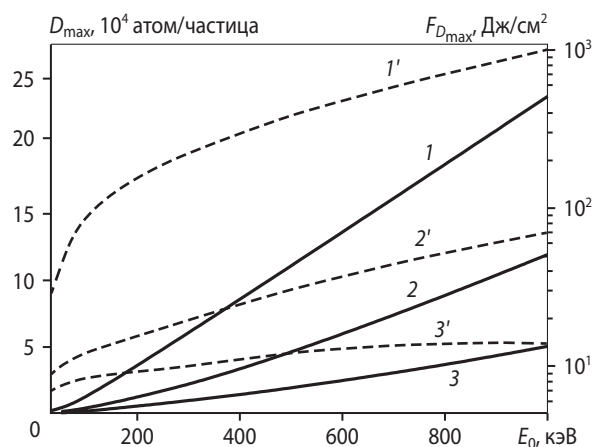


Рис. 3. Максимальные коэффициенты эрозии (сплошные линии) медной мишени и значения обеспечивающей их плотности энергии (штриховые) МИП в зависимости от начальной энергии электронов (1, 1'), протонов (2, 2') и ионов углерода (3, 3') при $\tau = 100$ нс

в зависимости от начальной энергии бомбардирующих частиц. При одинаковых E_0 электронные пучки способны создавать более высокие коэффициенты эрозии, чем ионные. Однако значения $F_{D_{\max}}$ у них на 1–2 порядка выше, чем в случае ионов.

Следует отметить, что с увеличением длительности импульса тока наблюдается уменьшение коэффициента эрозии. Это связано с возрастанием оттока тепла в глубину мишени из-за теплопроводности в течение облучения. Расчеты показывают, что наибольшие значения D достигаются при облучении импульсами длительностью $\sim 10^{-8} \div 10^{-7}$ с [9].

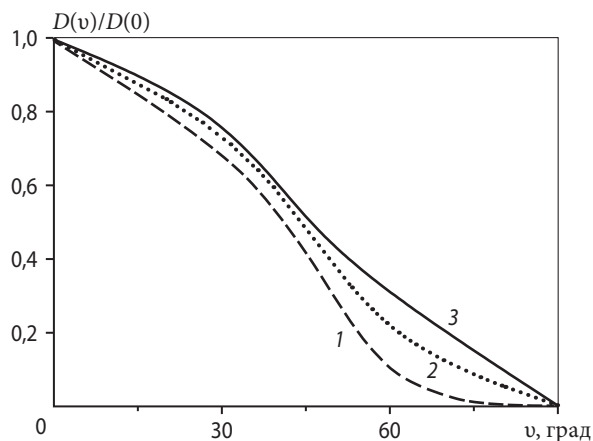


Рис. 4. Относительное изменение коэффициента эрозии поверхности меди в зависимости от угла падения на облучаемую поверхность пучка ионов аргона (1), углерода (2) и протонов (3) с $E_0 = 300$ кэВ и $J = 550, 700$ и 1300 А/см² соответственно при $\tau = 100$ нс

Ориентация пучка относительно облучаемой поверхности оказывает существенное влияние на значения коэффициентов эрозии в результате испарения. В качестве примера на рис. 4 представлено изменение относительной величины коэффициента эрозии (D) поверхности медной мишени в зависимости от угла падения потока частиц (ν), отсчитываемого от нормали к ней. Видно, что значения $D(\nu)/D(0)$ непрерывно уменьшаются с увеличением ν .

БАЛАНС ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАЛЕНИЯ АТОМОВ С ОБЛУЧАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для выявления режимов облучения, при которых энергоэффективность удаления атомов с облучаемой поверхности оказывается наибольшей, было исследовано изменение составляющих баланса энергии пучка в мишени в зависимости от его параметров.

Мы полагаем, что в рассматриваемом диапазоне параметров структура баланса энергии имеет следующий вид:

$$K_{ev} + K_{cond} + K_{screen} + K_{ref} = 1. \quad (2)$$

Здесь K_i – доли энергии пучка, расходуемой на нагрев, плавление и испарение тонких приповерхностных слоев мишени (K_{ev}), затрачиваемой на нагрев остальной части мишени, включая плавление и распространение тепла из области энерговыделения в холодное вещество (K_{cond}), потерянной в парах мишени (K_{screen}) и унесенной отраженными частицами пучка от облучаемой поверхности (K_{ref}). Заметим, что последний компонент является существенным лишь для электронных пучков с энергией частиц до 100 кэВ.

Затраты на тепловое излучение примерно на 4 порядка ниже плотности энергии МИП заряженных частиц, поэтому они не были учтены в расчетах.

В уравнении (2) не учтены потери энергии, связанные с тормозным излучением. В случае ионных и низкоэнергетических электронных пучков затраты энергии пучка на него ничтожно малы. Для электронных пучков с E_0 до 1000 кэВ они составляют не более 2–3 %.

По нашим оценкам, в случае ионных пучков меньше 0,1 % их энергии расходуется на распыление, поэтому затраты на него в энергетическом балансе также не были приняты во внимание.

На рис. 5 на примере облучения меди ионами углерода приведены зависимости компонентов K_{ev} , K_{cond} и K_{screen} от плотности тока (J). Для других комбинаций параметров субмикросекундных ионных пучков и других металлов качественный вид подобных кривых такой же.

С возрастанием J увеличивается доля энергии пучка, теряемой в парах вещества мишени. При этом количество энергии, расходуемой на нагрев конденсированной фазы, сокращается из-за того, что испарение наступает раньше и происходит с большей скоростью. В итоге обнаруживается максимум на кривой $K_{ev}(J)$, который тем больше, чем выше начальная энергия ионов и короче импульс тока при одинаковой плотности энергии в пучке.

На рис. 6 показано изменение энергии МИП заряженных частиц, приходящейся на 1 атом, удаленный с поверхности мишени (E_a), в зависимости от плотности мощности пучка. Наименьшие значения E_a , приближающиеся к энергии сублимации вещества мишени, имеют место для электронных пучков с $E_0 = 500 \div 1000$ кэВ. Они возникают при таких параметрах пучков, когда вещество переходит в паровую фазу в режиме гидродинамического разлета.

Сравнение импульсных пучков разного вида показывает, что электронные пучки способны превосходить по энергоэффективности ионные пучки с аналогичными энергиями частиц.

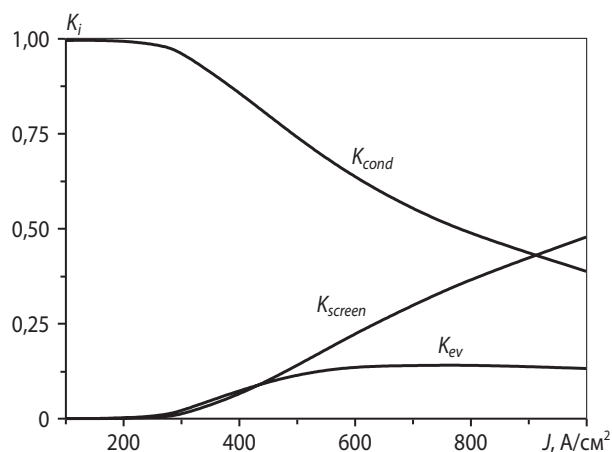


Рис. 5. Изменение составляющих баланса энергии на поверхности медной мишени по мере увеличения плотности тока пучка ионов углерода с $E_0 = 300$ кэВ и $\tau = 100$ нс

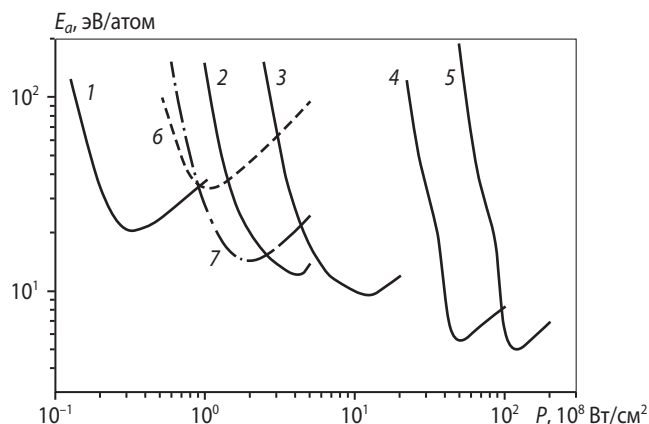


Рис. 6. Количество энергии МИП, приходящейся на 1 атом, удаленный с поверхности медной мишени, в зависимости от плотности мощности пучка электронов (1–5), ионов углерода (6) и протонов (7)

1 – $E_0 = 50$ кэВ и $\tau = 2$ мкс; 2 – 50 кэВ и 100 нс;
3 – 100 кэВ и 100 нс; 4 – 500 кэВ и 100 нс;
5 – 1 МэВ и 100 нс; 6, 7 – 100 кэВ и 100 нс

Значения плотности мощности и плотности энергии, которые обеспечивают наибольшую энергоэффективность МИП электронов, находятся в диапазонах от 10^9 до 10^{10} Вт/см² и от 100 до 1000 Дж/см² соответственно. Это на порядок выше значений этих же показателей, при которых субмикросекундные ионные пучки оказываются наиболее энергоэффективными в отношении эрозии.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволили выявить наиболее общие закономерности поведения коэффициентов эрозии поверхности металлов в зависимости от параметров субмикросекундных пучков заряженных частиц с энергией в диапазоне от 10 до 1000 кэВ. В первом приближении они сводятся к следующим правилам.

1. Наибольшие коэффициенты эрозии достигают значений 10^4 – 10^5 атом/частица и свойственны пучкам субмикросекундной длительности с начальной энергией частиц больше 100 кэВ и плотностью мощности, превышающей $5 \cdot 10^7$ Вт/см².

2. Для любой комбинации «тип частиц – их начальная энергия – длительность импульса тока – вещество мишени» характерен свой максимальный коэффициент эрозии, которому соответствует специфическое значение плотности тока. Чем больше глубина проникновения бомбарди-

рующих частиц в заданное вещество, тем выше значение максимального коэффициента эрозии.

3. Увеличение длительности импульса тока при заданной начальной энергии частиц и неизменном значении плотности энергии пучка приводит к уменьшению коэффициента эрозии и возрастанию затрат энергии пучка на удаление атомов.

4. Нелинейное повышение интенсивности эрозии по мере роста плотности энергии пучка может рассматриваться как пороговый процесс. Наименьшие значения плотности энергии для инициации этого явления имеют место в случае использования субмикросекундных ионных пучков с энергиями частиц выше 100 кэВ.

5. При одинаковых плотности мощности и длительности импульса тока в пучке энергоэффективность и интенсивность удаления вещества с облучаемой поверхности тем выше, чем больше начальная энергия частиц.

Наиболее эффективными с точки зрения получения высоких коэффициентов эрозии и наименьших затрат энергии пучка на удаление атомов с поверхности мишени являются электронные пучки субмикросекундной длительности с энергиями выше 100 кэВ. При этом максимум интенсивности и энергоэффективности приходится на диапазон плотности мощности от 10^9 до 10^{10} Вт/см² и плотности энергии от 100 до 1000 Дж/см² соответственно, что на порядок выше, чем в случае ионов.

Существуют такие режимы облучения МИП заряженных частиц, при которых почти вся энергия пучка расходуется на удаление атомов.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» № 2.1671.2011.

ЛИТЕРАТУРА

1. Davis H. A., Remnev G. E., Stinnet R. W., Yatsui K. // MRS Bull. 1996. № 8. P. 58.
2. Renk T. J., Provencio P. P., Prasad S. V. et al. // Proc. IEEE. 2004. Vol. 92, № 7. P. 1057.
3. Шулов В. А., Ночовная Н. А., Ремнев Г. Е., Львов А. Ф. // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 1. С. 22.
4. Пайкин А. Г., Шулов В. А., Крайников А. В. и др. // Там же. 2007. № 3. С. 44.
5. Shulov V. A., Bytzenko O. A., Teryaev D. A. et al. // Proc. 10-th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams

- and Plasma Flows (Tomsk, Sept. 19–24, 2010). Tomsk: IOA SB RAS, 2010. P. 359.
6. Блейхер Г. А., Кривобоков В. П., Пащенко О. В. Тепло-массоперенос в твердом теле под действием мощных импульсных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 1999.
7. Блейхер Г. А., Кривобоков В. П. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2008. № 1. С. 23.
8. Bleykher G. A., Krivobokov V. P. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2012. Vol. 292. P. 34.
9. Блейхер Г. А., Кривобоков В. П., Платонов М. А. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 8. С. 49.

УДК 669.716.9

КЕРАМИКО-МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ (TiN–Cu) НАНОСТРУКТУРНЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ВАКУУМНО-ДУГОВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

© 2013 г. **И. В. Блинков, А. О. Волхонский, А. И. Лаптев, Т. А. Свиридова, Н. Ю. Табачкова, Д. С. Белов, А. В. Ершова**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

И. В. Блинков – докт. техн. наук, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (499) 236-70-85. E-mail: biv@misys.ru.

А. О. Волхонский – канд. техн. наук, ассистент той же кафедры. E-mail: abvest@yandex.ru.

А. И. Лаптев – докт. техн. наук, вед. науч. сотр. НИЛ «СТМ» НИТУ «МИСиС». E-mail: laptev@misys.ru.

Т. А. Свиридова – канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. центра композиционных материалов НИТУ «МИСиС». E-mail: tim-170@yandex.ru.

Н. Ю. Табачкова – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ЦКП «Металлургия и материаловедение» НИТУ «МИСиС». E-mail: ntabachkova@gmail.com.

Д. С. Белов – аспирант кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС». E-mail: lightning4s@yandex.ru.

А. В. Ершова – студентка той же кафедры.

Проведены исследования по изучению структуры и свойств покрытий TiN–Cu с широким интервалом концентраций меди ($C_{Cu} = 0,6 \div 20$ ат.%), полученных методом ионно-плазменного вакуумно-дугового осаждения на твердосплавном режущем инструменте ТТ10К8Б, включая его стойкостные испытания по резанию. Введение меди в состав покрытия приводит к измельчению кристаллитов нитридной фазы от 100 до 20 нм. При этом твердость покрытий растет с 20 до 40 ГПа при увеличении C_{Cu} до 7–8 ат.%. Дальнейшее повышение содержания меди, сопровождающееся измельчением кристаллитов нитридной фазы, характеризуется уменьшением твердости до 14–15 ГПа, которое связано с влиянием на нее мягкого пластичного металла. Проведенные стойкостные испытания по резанию стали 35ХГСА сменных многогранных пластин (СМП) с покрытиями TiN–Cu свидетельствуют о том, что оптимально подобранный состав (TiN – 7–8 ат.% Cu) увеличивает стойкость СМП более чем в 6 и 2,5 раза по сравнению с инструментом без покрытия и с покрытием TiN, нанесенным по базовой технологии, соответственно.

Ключевые слова: ионно-плазменное осаждение, покрытия для режущего инструмента, структуро- и фазообразование в системе Ti–Cu–N, твердость покрытий, стойкость инструмента с покрытием, наноструктурирование.

Studies of structure and properties of TiN–Cu coatings with a wide interval of copper concentrations from 0,6 to 20 at. % have been carried out including its cutting action tests. The coatings were produced by the ion-plasma vacuum-arc deposition onto TT10K8B carbide cutting tool. Introduction of copper into the composition of the coating results in nitride phase crystallite size reduction from 100 to 20 nm. In this case the hardness of coatings grows from 20 to 40 GPa while copper content in the coating increases up to 7–8 at. %. Further increase of copper content, which is accompanied by nitride phase crystallite size reduction, is characterized by decrease of hardness down to 14–15 GPa concerned with the effect of soft ductile metal on it. The life tests of mechanical cutting by TiN–Cu coated 35KhGSA SMP steel show that the optimum composition of the coatings (TiN – 7–8 at. % Cu) increases the durability of tools with replaceable polygonal inserts (SMP) more than 6 and 2,5 times compared with uncoated tool and TiN coated tool according to the basic technique respectively.

Key words: ion-plasma deposition, coatings for machining tools, structure and phase formation in the Ti–Cu–N system, hardness of coatings, durability of coated tool, nanostructurization.

Получение нитридных покрытий различного функционального назначения с размером зерен менее 100 нм (наноструктурирование) дает возможность реализовать в них высокие значения твердости, сочетающейся с пластичностью, что

обеспечивает повышенные характеристики износостойкости в условиях как постоянных, так и знакопеременных нагрузок [1–3]. Одним из возможных путей ограничения роста зерен материала покрытия в процессе его осаждения является