

в ЗТВ – до ~ 2200 МПа. В ЗТВ твердость выше, чем у основы, и она является как бы переходной от зоны проплава к матрице. Эта зона оказывает благоприятное влияние на свойства наплавки.

В процессе нагрева в структуре происходят существенные изменения, связанные с распадом пересыщенных твердых растворов и образованием ферритно-цементитных фаз с высокодисперсными структурами типа троостита и сорбита отпуска (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многослойная структура во всех исследованных схемах наплавки формируется в результате закали и многократного отпуска. В большей степени она зависит от количества легирующих элементов, приходящихся на единицу объема расплавленного металла, а скоростные процессы нагрева и охлаждения обеспечивают образование дисперсной структуры с разнообразным фазовым составом.

Измерения твердости по глубине всей наплавки показали значительный разброс микротвердости в каждой последующей нанесенной дорожке.

Нагрев наплавки всех видов при температурах 650 и 750 °С приводит к снижению твердости и напряжений, уменьшению размера блоков и параметра кристаллической решетки железа (см. табл. 3).

Полученные результаты позволяют упростить подбор режимов для процесса лазерной наплавки исходя из заданных эксплуатационных свойств конкретных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки. М.: Высш. шк., 1987.
2. Tominsky V.S., Postnikov V.S. // Key Eng. Mater. Trans. Tech. Publi. 1990. Vol. 46–47. P. 473.
3. Долговечный А. В., Демидова Л. А., Морозов Е. А. // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1(2). С. 550.

УДК 537.534.9 : 621.785

МИКРОСТРУКТУРА, ТЕПЛОПЕРЕНОС И ПЛАВЛЕНИЕ СЛОЕВ ТВЕРДОГО СПЛАВА, СОДЕРЖАЩЕГО КАРБИДЫ ТИТАНА И ВОЛЬФРАМА, В УСЛОВИЯХ МОЩНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

© 2014 г. **А. К. Кулешов, А. С. Якушевич, В. В. Углов, В. М. Асташинский, Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Крутилина**

Белорусский государственный университет (БГУ), г. Минск, Респ. Беларусь
«Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны», г. Минск, Респ. Беларусь
Институт физики (ИФ) им. Б. И. Степанова НАНБ, г. Минск, Респ. Беларусь
Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, г. Томск

Статья поступила в редакцию 06.02.2013 г., доработана 06.03.2013 г., подписана в печать 11.03.2013 г.

А. К. Кулешов – канд. физ.-мат. наук, зав. НИЛ «Физика ионно-плазменной модификации твердых тел» физического факультета БГУ (220030, Респ. Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 4). Тел.: (+375 17) 226-58-34. Факс: (+375 17) 226-55-52. E-mail: kuleshak@bsu.by.

А. С. Якушевич – магистрант Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны» (220109, Респ. Беларусь, г. Минск, ул. Красина, 99). Тел.: (+375 29) 211-64-99. E-mail: jakuban@yandex.by.

В. В. Углов – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой физики твердого тела БГУ. Тел.: (+375 17) 209-51-34. Факс: (+375 17) 226-54-45. E-mail: uglov@bsu.by.

В. М. Асташинский – докт. физ.-мат. наук, зав. сектором физики плазменных ускорителей ИФ НАНБ (220072, Респ. Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 68). Тел.: (+375 17) 284-10-65. E-mail: ast@imaph.bas-net.by.

Н. Н. Коваль – докт. физ.-мат. наук, проф., зам. директора по научной работе ИСЭ СО РАН (634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3). Тел.: (3822) 49-17-06. E-mail: koval@hcei.isc.ru.

Ю. Ф. Иванов – докт. физ.-мат. наук, проф., ст. науч. сотр. ИСЭ СО РАН. Тел.: (3822) 43-17-13. E-mail: yufi55@mail.ru.

Е. А. Крутилина – аспирант кафедры физики твердого тела физического факультета БГУ. Тел.: (+375 17) 209-55-12. Факс: (+375 17) 226-55-52. E-mail: uglov@bsu.by.

Исследовано влияние плотности энергии и количества импульсов при воздействии компрессионными плазменными потоками (КПП) и сильноточными электронными пучками (СЭП) на глубину плавления и микроструктуру модифицированных слоев сплава Т15К6. Предложен способ компьютерного моделирования теплопереноса при таких мощных воздействиях на твердый сплав, учитывающий объемное соотношение компонентов сплава, изменение их теплофизических характеристик с ростом температуры, различие формы импульса и соответствующего пространственного энерговыделения. Сравнение расчетных глубин проплавления компонентов сплава для СЭП и КПП с экспериментальными данными в интервале плотностей энергии 30–50 Дж/см² показало их хорошее согласование. Выявлена взаимосвязь особенностей теплового воздействия СЭП и КПП с глубиной плавления и микроструктурой модифицированных слоев сплава Т15К6.

Ключевые слова: твердый сплав, импульсные плазменные потоки, электронные пучки, микроструктура, моделирование теплопереноса.

The effect of energy density and pulse number of compression plasma flow (CPF) and high-current electron beams (HCEB) treatments on melting depth and microstructure of modified layer of T15K6 hard alloy has been investigated. The method of computerized modeling of heat transmission during such high-powered impacts on hard alloy considering the volume ratio of alloy components, change of their thermophysical properties with a rise in temperature, difference in pulse form, and corresponding spatial energy-release is proposed. The comparison of calculated depth of alloy components fusion for HCEB and CPF with experimental data in the energy density interval of 30–50 J/cm² shows their good correction. The interrelationship of HCEB and CPF heat effect peculiarities with melting depth and microstructure of modified T15K6 hard alloy layer is found.

Key words: hard alloy, pulse plasma flows, electron beams, microstructure, heat transfer simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Мощные импульсные потоки энергии (высококонцентрированные ионные пучки, сильноточные электронные пучки (СЭП), компрессионные плазменные потоки (КПП) и др.) со значениями плотностей энергий в импульсе до десятков Дж/см² можно использовать для модификации свойств поверхностных слоев твердых сплавов. Результат такого воздействия – быстрый нагрев поверхности и приповерхностного слоя выше температуры плавления с последующей их кристаллизацией с высокими скоростями охлаждения и формированием высокодисперсной структуры [1–5].

Несмотря на существенные различия в технических принципах генерации мощных импульсных потоков, тепловое воздействие является преобладающим процессом и поэтому описывается сходными физико-математическими моделями [6–8]. В этом случае процессы теплопереноса зависят от максимальной плотности мощности, числа, частоты и длительности импульсов [7–9]. Вместе с тем остается нерассмотренным моделирование теплопереноса при воздействии концентрированных потоков энергии на такой своеобразный композиционный материал, как твердый сплав. Так как при моделировании импульсного теплового воздействия на композиционный материал возникает ряд трудностей, связанных с правильным и полным заданием зависимостей теплофизических параметров веществ от температуры, химического и фазового составов, необходимо учитывать процессы, сопровождающие теплоперенос (плавление, испарение, растворение) [9–12]. Кроме того,

для различных типов импульсного воздействия требуется также принимать во внимание особенности временного распределения тепла по глубине материала. Выявление деталей строения микроструктуры модифицированных слоев сплава Т15К6 по глубине модифицированного слоя в зависимости от интервала параметров воздействия КПП и СЭП и сравнение с данными компьютерного моделирования теплопереноса, учитывающими многофазный состав сплава Т15К6, являются актуальной задачей. Поэтому цель настоящей работы включала:

а) исследование влияния плотности энергии и количества импульсов при воздействии КПП и СЭП на глубину плавления и микроструктуру модифицированных слоев сплава Т15К6;

б) сравнение полученных экспериментальных данных с численным компьютерным моделированием температурных полей, глубин плавления карбидных фаз твердого сплава при соответствующих эксперименту параметрах воздействия СЭП и КПП;

в) выявление отличительных особенностей теплового поглощения энергии сплавом Т15К6 при воздействии СЭП и КПП на микроструктурное состояние его модифицированных слоев.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Объектами исследования служили образцы твердого сплава Т15К6 в виде пластинок размером 10×10×4 мм.

Облучение СЭП проводили на ускорителе SOLO при следующих условиях: длительность импульса 100 мкс, количество импульсов 1–45, энергия электронов 20 кэВ, частота следования импульсов 1 Гц, давление остаточных газов (аргон) в камере 0,2 Па. Плотность энергии изменяли от 20 до 50 Дж/см², варьируя плотность электронного тока.

Основные параметры КПП: плазмообразующий газ – азот, его давление 400 Па, длительность импульса 100 мкс, количество импульсов от 1 до 15, напряжение разряда 4,5 кВ, частота следования импульсов 0,03 Гц. Расстояние между катодом и образцом изменяли в интервале 80–140 мм, что позволяло варьировать величину плотности энергии за один импульс, поглощаемой образцом сплава, в интервале 19–50 Дж/см². Значения плотностей поглощаемой энергии определяли в результате сравнительных калориметрических измерений для образцов низкоуглеродистой стали [12], твердого сплава, а также на основании экспериментальных и расчетных данных о глубине их плавления.

Для выявления изменения с глубиной микроструктурного строения модифицированных слоев твердого сплава после воздействия приготавливали поперечные шлифы образцов сплава, которые затем исследовали с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1455VP.

Для определения теплопроводности твердого сплава в процессе воздействия КПП и СЭП применяли компьютерное моделирование методом конечных элементов с помощью пакета Comsol Multiphysics 4.2 [13].

Учет в расчетах изменения теплофизических характеристик (теплопроводности (k), изобарной теплоемкости (C_p), плотности (ρ)) фаз сплава (TiC, (Ti, W)C, WC, Co) в зависимости от температуры проводили с использованием справочных данных [14–18]. При моделировании твердый сплав был представлен в виде двумерной системы размером 50×120 мкм, составленной из квадратных элементов фаз сплава WC, TiC, Co размером 1×1 мкм. Причем процентное соотношение компонентов сплава в моделируемой системе было сохранено.

Размеры самой моделируемой системы были приняты из следующих соображений. Высота, равная 120 мкм, взята с таким расчетом, чтобы после окончания действия импульса с плотностью энергии до 80 Дж/см² при облучении образца с од-

ной стороны температура на противоположной стороне составляла 400 К. Данное приближение учитывает уход тепла в глубь образца. Величина этой температуры установлена на основании совокупности проведенных сравнительных расчетов и экспериментальных данных при воздействии КПП на твердый сплав и кремний, сталь, а также систему «пленка металла на кремнии» [10–12] с учетом разницы теплофизических параметров этих материалов. Площадь моделируемого воздействия на сплав была выбрана 50×50 мкм, так как согласно [11] компрессионный плазменный поток на таком участке однороден.

При решении уравнения теплопроводности

$$\rho C_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_T, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³; C_p – его изобарная теплоемкость, Дж/(кг · К); k – теплопроводность вещества, Дж/(кг · К); Q_T – количество тепла от внешнего источника, Дж/(см · м³); T – температура, К; t – время, с, были заданы следующие условия:

начальная температура 300 К;

$$x = 0 \text{ мкм}, x = 50 \text{ мкм}: -\vec{n} \cdot (-k \nabla T) = 0; \quad (2)$$

$$y = 120 \text{ мкм}: -\vec{n} \cdot (-k \nabla T) = \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4). \quad (3)$$

Здесь ε – коэффициент черноты; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Дж/(с · м² · К⁴); T_{amb} – температура окружающей среды, К; \vec{n} – нормаль к поверхности; $\varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4)$ – потери в окружающую среду.

Условие (2) означает, что боковые стенки объекта изолированы, а условие (3) – потери тепла через излучение через нижнюю поверхность объекта.

При воздействии плазменных потоков на материалы не происходит существенного проникновения слабо заряженных частиц плазмы в глубь материала. Величина этого проникновения, по оценкам [11], не превышает 100 нм. Поэтому распределение энергии в материале при КПП-воздействии определялось поверхностным источником тепла. Временное распределение энергии в импульсе при КПП-воздействии на сплав, используемое в моделировании и представленное на рис. 1, а, было аналогично экспериментальной временной зависимости излучения энергии при взаимодействии КПП с преградой [19, 20].

В случае воздействия на вещество СЭП с энергиями порядка десятков кэВ происходит распре-

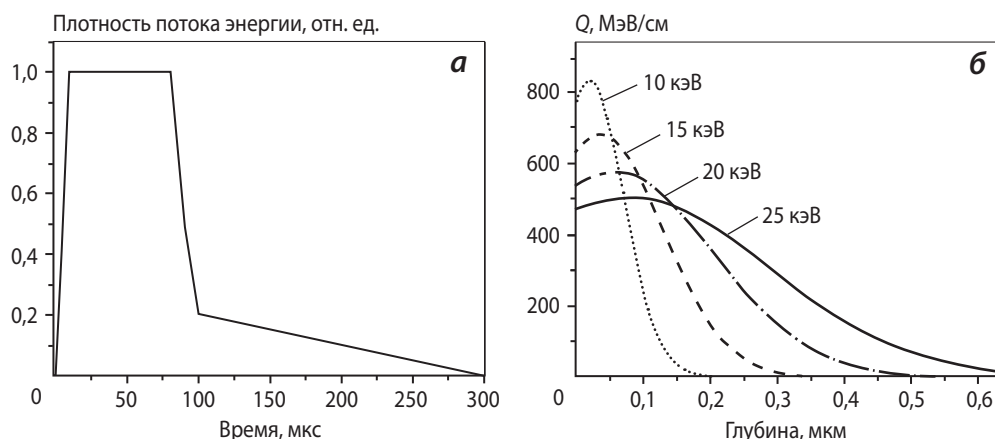


Рис. 1. Временное распределение плотности потока энергии в импульсе КПП (а) и пространственное распределение энергии электронов в сплаве Т15К6 в зависимости от энергии импульса СЭП (б)

деление энергии электронов по глубине их пробега в веществе [21]. Следовательно, распределение энергии по глубине материала от времени описывается функцией энерговыделения [21]. Согласно [21], временное и пространственное распределение функции энерговыделения можно считать независимыми, а функцию мощности энерговыделения можно представить в виде

$$W(x,t) = e^{-1}Q(x)j(t), \quad (4)$$

где e – заряд электрона, $Q(x)$ – пространственное распределение потерь энергии при прохождении одной частицы через вещество (удельные потери энергии), $j(t)$ – плотность тока в импульсе.

При расчете мощности энерговыделения распределение плотности тока по сечению электронного луча считалось равномерным. Для расчета пространственного распределения удельных потерь энергии использовалась функция Гаусса при аналитической аппроксимации по методу В. В. Макарова [21]. При переходе к моделируемой задаче, которая является двумерной, применялась связь между мощностью единицы объема теплового источника и мощностью единицы площади в перпендикулярном сечении материала [22]. Для исследуемой многокомпонентной системы твердого сплава была найдена эквивалентная однородная мишень, в которой торможение и рассеяние электронов происходили бы так же, как и в сплаве, при этом был использован метод, описанный в работе [21].

Полученные пространственные распределения потерь энергии при прохождении электронов через твердый сплав Т15К6 в зависимости от энергии импульса СЭП изображены на рис. 1, б.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты изменения микроструктуры внутренних слоев сплава Т15К6 в зависимости от плотности энергии и количества импульсов воздействия КПП представлены на рис. 2. Микроструктура сплава после обработки с плотностью энергии в импульсе 33 Дж/см² (рис. 2, а) не изменяется, она подобна исходной микроструктуре сплава Т15К6 [6]. Следует отметить, что исходное структурное состояние сплава Т15К6 представляет собой ограниченные частицы карбида вольфрама (WC) и более округлые частицы твердого раствора (Ti, W)C, связанные кобальтом. В РЭМ-изображении (элементный контраст) ограниченные области светло-серого цвета соответствуют WC, темно-серые области – твердому раствору (Ti, W)C, а по границам карбидов преимущественно распределен Co (см. рис. 2, а).

Увеличение плотности энергетического воздействия КПП до 39 Дж/см² при $N = 5$ имп. приводит к формированию переплавленного слоя толщиной порядка 1 мкм (рис. 2, б), имеющего однородный светло-серый контраст в РЭМ-изображении. За ним расположен частично переплавленный слой, содержащий расплавленные прослойки WC между нерасплавленными зернами (Ti, W)C. Далее следует слой с нерасплавленными зернами как WC, так и (Ti, W)C. Дальнейшее повышение значения плотности энергии до 50 Дж/см² (рис. 2, в) влечет рост толщины переплавленного слоя до 5–6 мкм. Он имеет мелкодисперсную структуру со светло-серым элементным контрастом, в котором заметны образования с поперечным размером 0,2–0,3 мкм, разделенные более светлыми границами. Известно, что фазовые со-

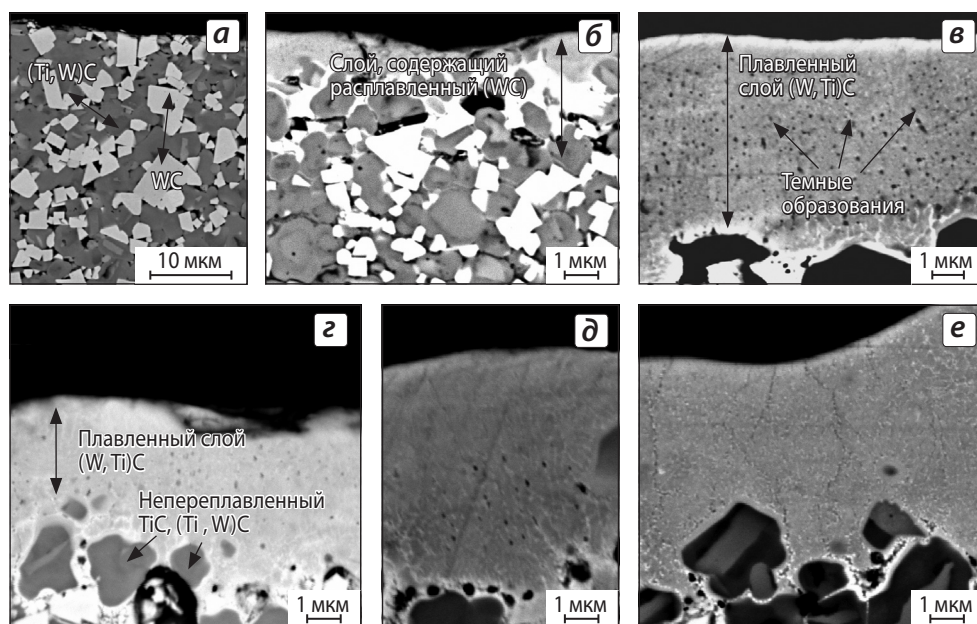


Рис. 2. РЭМ-изображение микроstructures внутренних слоев твердого сплава Т15К6 в зависимости от плотности энергетического воздействия КПП в импульсе (w) и количества импульсов (N)
 w , Дж/см²: 33 (а), 39 (б), 50 (в-е)
 N , имп.: 5 (а-в), 1 (г), 10 (д), 15 (е)

ставы сплавленных поверхностных слоев сплава Т15К6 толщиной до нескольких мкм после КПП-и СЭП-воздействия подобны и включают в основном пересыщенный вольфрамом твердый раствор (W, Ti)C и очень малую долю других фаз – W_2C , $Co_xW_yC_z$, графит [6, 23]. При этом интегральная интенсивность дифракционных рефлексов фазы (W, Ti)C является преобладающей. В РЭМ-изображении наблюдаются в основном светлые образования с поперечным размером 0,2–0,3 мкм, поэтому можно предполагать, что они соответствуют твердому раствору (W, Ti)C.

Переплавленный слой содержит и темно-серые образования, представляющие собой не полностью расплавленные частицы (Ti, W)C, так как соотношение Ti и W в них, определенное с помощью микроанализа, соответствует зернам (Ti, W)C исходного сплава (см. рис. 2, б). Также в нем содержатся и более мелкие темные образования (см. рис. 2, в), являющиеся, возможно, порами, графитом. При воздействии с $N = 1$ и 5 имп. и плотностью энергии 50 Дж/см² (рис. 2, в, г) толщины оплавленных слоев подобны. При большем количестве импульсов ($N = 10$ и 15 имп.) (рис. 2, д-е) толщина переплавленного слоя не увеличивается. Возрастает его однородность, так как в нем отсутствуют темные образования.

Результаты изменения микроstructures поперечных шлифов сплава Т15К6 в зависимости от плотности энергии и количества импульсов СЭП-воздействия представлены на рис. 3. Можно отме-

тить, что после обработки СЭП с $w = 30$ Дж/см² и $N = 5$ имп. плавления сплава не наблюдается (рис. 3, а), как и в случае КПП-воздействия при $w = 33$ Дж/см². При $w = 40$ Дж/см² (рис. 3, б) формируется слой, содержащий частично оплавленные включения карбидов сплава, в то же время полного расплавления карбидов (Ti, W)C в этом слое не происходит. Толщина модифицированного слоя составляет 3–4 мкм. Увеличение плотности энергии в импульсе до 50 Дж/см² подобно КПП-обработке приводит к получению полностью переплавленного слоя (плавится WC и (Ti, W)C) толщиной до 4–6 мкм (рис. 3, в).

При воздействии одного импульса СЭП с плотностью энергии 50 Дж/см², в отличие от КПП, образуется полностью переплавленный слой совсем небольшой толщины: 1,0–2,5 мкм (см. рис. 2, г и рис. 3, г). При увеличении количества импульсов от 5 до 15 и 45 при обработке СЭП с плотностью энергии 50 Дж/см² глубина проплавленного слоя, по сравнению с КПП-технологией (см. рис. 2, е), изменяется значительно – от 4–6 до 15 и 30 мкм соответственно (рис. 3, в, д, е). Особенностью микроstructureного строения переплавленных слоев после воздействия СЭП, в сопоставлении с КПП, является наличие в поверхностном слое толщиной порядка 10 мкм столбчатой структуры светло-серых образований твердого раствора (W, Ti)C, направленной перпендикулярно к поверхности (см. рис. 3, д, е). На глубинах переплавленных

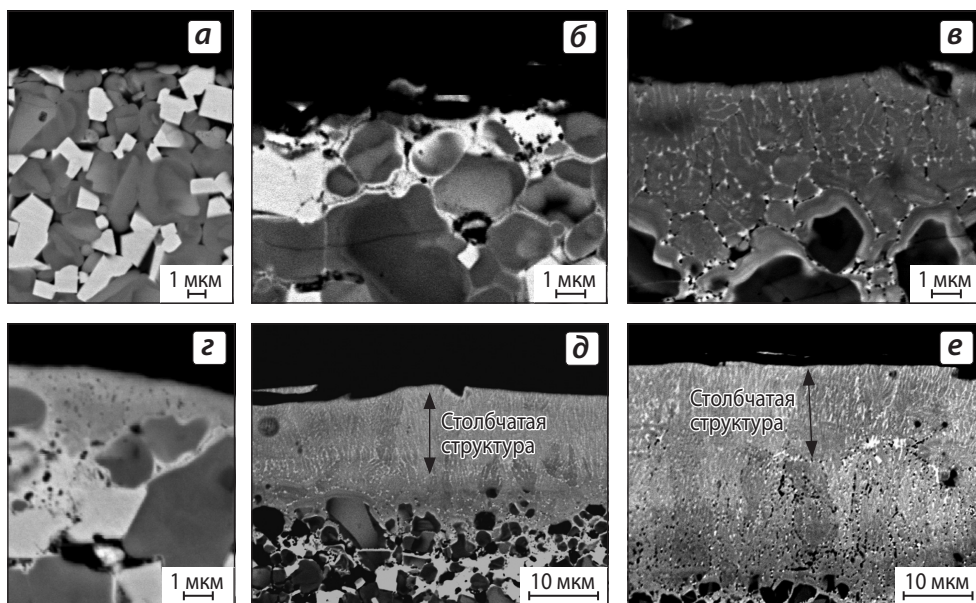


Рис. 3. РЭМ-изображение микроструктуры внутренних слоев твердого сплава Т15К6 в зависимости от плотности энергетического воздействия СЭП в импульсе (w) и количества импульсов (N)
 w , Дж/см²: 30 (а), 40 (б), 50 (в-е)
 N , имп.: 5 (а-в), 1 (г), 15 (д), 45 (е)

слоев более 10 мкм светло-серые образования не имеют столбчатого строения (см. рис. 3, в).

Более высокая дисперсность микроструктуры переплавленных слоев после воздействия КПП связана, по нашему мнению, с наличием интенсивного конвективного перемешивания плавящихся слоев, стимулированного давлением плазменного потока на поверхность сплава [24–26].

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Как следует из результатов моделирования (рис. 4), максимальная температура на поверхности сплава достигается в момент окончания действия импульса СЭП. Для КПП-воздействия это происходит в момент времени $t = 82$ мкс.

Данные расчетов температуры поверхности сплава и скорости ее охлаждения, представленные в табл. 1, показывают, что скорости охлаждения после окончания действия импульса ($t = 100$ мкс) могут достигать значений порядка 10^7 К/с.

В результате воздействия СЭП с плотностью энергии 50 Дж/см² по прошествии времени 1 с поверхность сплава перед началом действием второго импульса будет иметь температуру 402 К

Таблица 1. Изменение со временем температуры поверхности сплава и скорости ее охлаждения после воздействия СЭП и КПП с плотностью энергии 50 Дж/см²

Время, с	Т, К		Скорость охлаждения, К/с	
	СЭП	КЭП	СЭП	КПП
0,0001	3467	3081	$1,1 \cdot 10^7$	$0,9 \cdot 10^7$
0,01	1166	1169	834	990
1	402	404	400	400

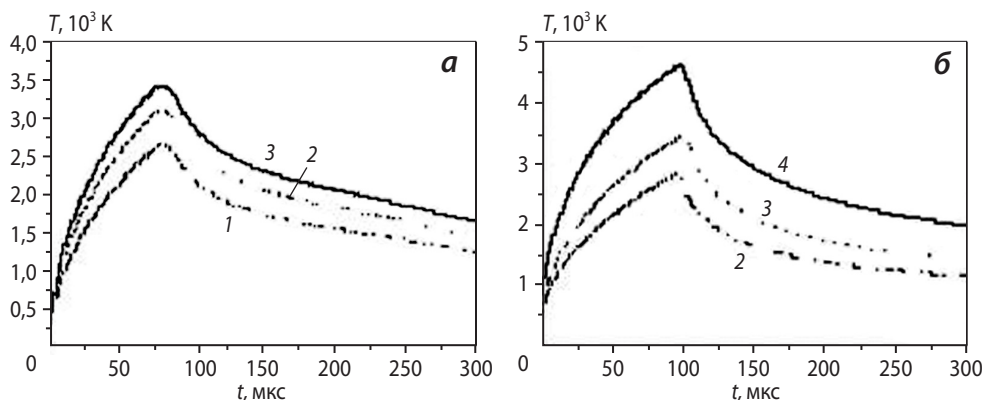


Рис. 4. Изменение температуры на поверхности сплава Т15К6 в зависимости от плотности энергии и времени воздействия одного импульса
 а – КПП, б – СЭП
 w , Дж/см²: 30 (1), 40 (2), 50 (3), 75 (4)

(см. табл. 1). При КПП-обработке частота следования импульсов в 30 раз меньше, поэтому второй импульс начинает воздействовать на сплав через 30 с после окончания действия первого. Скорость охлаждения в 400 К/с после $t = 1$ с (см. табл. 1) достаточна, чтобы через $t = 30$ с сплав, имеющий $T = 402$ К, остыл до комнатной температуры. Следовательно, при КПП-воздействии сплав охлаждается до комнатной температуры перед началом второго импульса. В случае СЭП-обработки с плотностью энергии 50 Дж/см² наличие остаточного нагрева сплава качественно объясняет увеличение глубины проплавления с ростом числа импульсов (см. рис. 3, г–е).

Для сравнения предложенного способа моделирования нагрева и плавления сплава Т15К6 с экспериментальными данными рассчитывали распределения температур по глубине сплава (рис. 5) в зависимости от экспериментальных параметров воздействий КПП и СЭП. Полученные результаты сравнивали с литературными данными минимальной температуры плавления входящих в сплав карбидных фаз (TiC, WC) [1, 16–18, 27] (рис. 5).

В табл. 2 приведены используемые для анализа величины температур плавления (максимальное и минимальное значения) фаз сплава, так как в различных источниках эти данные отличаются. Средняя минимальная температура плавления твердого раствора (Ti, W)C была определена на основании диаграммы состояния [25]. Обобщенные результаты проведенного сравнения представлены на гистограмме (рис. 6).

Как следует из приведенных на рис. 5 расчетных данных, при обоих видах обработок сплава Т15К6 с $w = 30$ Дж/см² плавления карбидных фаз сплава не происходит, так как на поверхности сплава не достигается температура плавления фаз WC, (Ti, W)C. Эти результаты подтверждаются микроструктурными исследованиями поперечных шлифов сплава после воздействия КПП и СЭП с $w = 30$ Дж/см² и $N = 5$ имп. (см. рис. 2, а и рис. 3, а).

Следует отметить, что глубина полного плавления слоя сплава определяется глубиной плавления его наиболее тугоплавкого карбида (Ti, W)C. Расчетные максимальные глубины полного плавления фаз WC, (Ti, W)C при воздействии на сплав одного импульса КПП и СЭП с плотно-

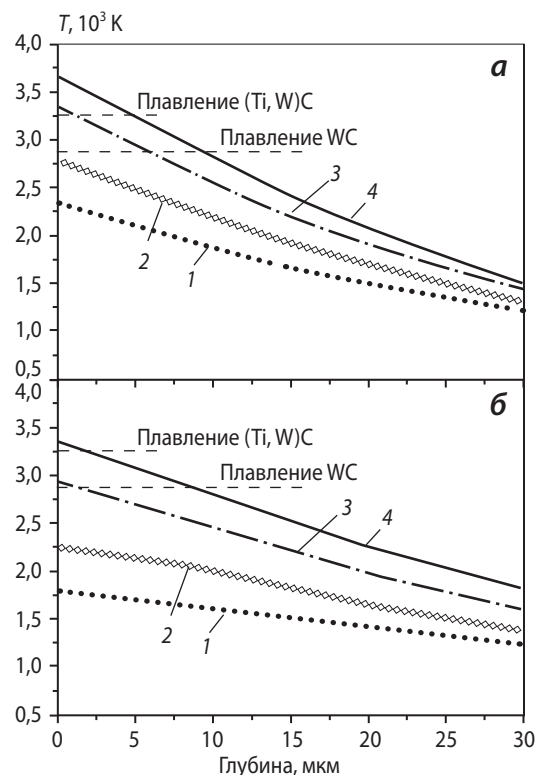


Рис. 5. Распределение температуры по глубине сплава Т15К6 после воздействия одного импульса КПП в момент времени 82 мкс (а) или СЭП в момент окончания действия импульса (б)

w , Дж/см²: 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4)

стью энергии 40 Дж/см² показывают (см. рис. 5 и 6), что в случае СЭП плавление (Ti, W)C не должно происходить, а при КПП оно возможно на небольшую (до 1 мкм) глубину. Результаты микроструктурных исследований, свидетельствующие об отсутствии плавления фазы (Ti, W)C после СЭП-воздействия (см. рис. 3, б), а в случае КПП – о формировании оплавленного слоя (Ti, W)C толщиной ~ 1 мкм (см. рис. 2, б), в определенной мере согласуются с расчетными данными. Однако в поверхностном слое имеются крупные непереплавленные частицы (Ti, W)C размером в несколько мкм (см. рис. 2, б). Это означает, что при моделировании не учитывается размер частиц. Для крупных частиц время, в течение которо-

Таблица 2. Температуры плавления фаз

Фаза	$T_{пл}$, К	
	min	max
TiC	3433	3530
WC	2873	3146
(Ti, W)C	3273	–

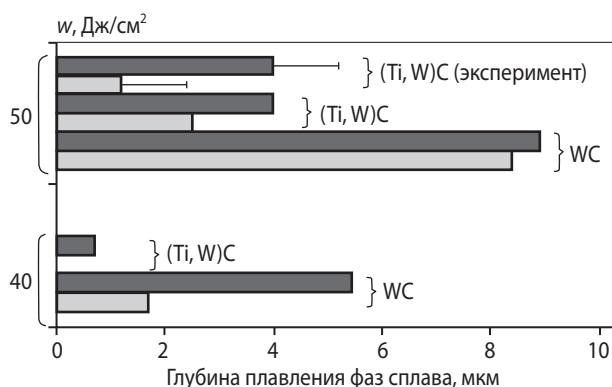


Рис. 6. Рассчитанные глубины плавления фаз сплава T15K6 ((Ti, W)C, WC) в зависимости от плотности энергии воздействия одного импульса длительностью 100 мкс. Светло-серым – СЭП-обработка, темно-серым – КПП

го достигается температура плавления (Ti, W)C, весьма мало и, следовательно, количества поглощенной энергии будет недостаточно для их полного расплавления.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных, отображенное на рис. 6, было проведено для плотности энергетического воздействия 1 импульса СЭП и КПП 50 Дж/см², позволяющей плавить более толстые слои сплава. Были использованы расчетные и экспериментальные данные, приведенные на рис. 2, г, рис. 3, г и рис. 5. Результаты этого сравнения (см. рис. 6) свидетельствуют о хорошем согласовании расчетных и экспериментальных данных.

Следует отметить, что представленные распределения температур по глубине сплава T15K6 (см. рис. 5, б) показывают, что повышение плотности энергии в импульсе СЭП с 30 до 50 Дж/см² приводит к приросту температуры на поверхности на 1000 К. Результаты моделирования нагрева сплава T15K6 при СЭП-обработке на основе уравнения теплопроводности с подобными параметрами, в котором не учитывается зависимость теплофизических свойств фаз сплава от температуры, дают лишь незначительный прирост температуры на поверхности (200 К) при таком же росте плотности энергии [23].

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что возрастание плотности энергии в импульсе от 30–40 до 50 Дж/см² при КПП- и СЭП-обработках твердого сплава

T15K6 приводит к плавлению его поверхностного слоя. Микроструктура переплавленных слоев после КПП-воздействия с плотностью энергии 50 Дж/см² имеет высокую дисперсность со средним размером образований (W, Ti)C 0,2–0,3 мкм. Для СЭП-обработки характерно наличие более крупных столбчатых образований (W, Ti)C, перпендикулярно направленных к поверхности, с максимальным продольным размером до 10 мкм.

2. Предложен способ компьютерного моделирования теплопереноса при рассмотренных воздействиях на твердый сплав, учитывающий объемное соотношение фаз сплава, изменение их теплофизических характеристик с ростом температуры, различие пространственного энерговыделения. Сравнение расчетных глубин проплавления компонентов сплава для СЭП- и КПП-обработок с экспериментальными микроструктурными данными в интервале плотностей энергии 30–50 Дж/см² показало их хорошее согласование. Расчет свидетельствует, что увеличение плотности энергии в импульсе обоих воздействий с 30 до 50 Дж/см² приводит к приросту температуры на поверхности на 1000 К, обеспечивая превышение температуры плавления сплава.

3. С помощью моделирования установлено, что в случае КПП-обработки ($w = 50$ Дж/см²) сплав остывает перед началом действия последующего импульса, что согласуется с микроструктурными данными о неизменности толщины переплавленного слоя (6 мкм) с увеличением количества импульсов от 5 до 15. Более высокая частота следования импульсов при СЭП-воздействии и наличие остаточного нагрева приводят к росту глубины плавления до 30 мкм ($N = 45$ имп.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Киффер Р., Бенезовский Ф. Твердые сплавы. М.: Металлургия, 1971.
2. Бойко В. И., Валяев А. Н., Погребняк А. Д. // Успехи. физ. наук. 1999. Т. 169, № 11. С. 1243.
3. Погребняк А. Д., Кульментьева О. П. // Физ. инженерия пов-ти. 2003. Т. 1, № 2. С. 108.
4. Иванов Ю. Ф., Колубаева Ю. А., Овчаренко В. Е. // Изв. Томск. политех. ун-та. Физика. 2008. Т. 313, № 3. С. 93.
5. Uglov V. V., Anishchik V. M., Astashynski V. M. et al. // Surf. Coat. Technol. 2005. Vol. 200. P. 245.

6. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978.
7. Букрина Н. В., Князева А. Г. // Изв. ТПТУ. 2007. Т. 310, № 1. С. 91.
8. Солоненко О. П., Головин А. А. // Вестн. Югорского гос. ун-та. 2011. Вып. 2 (21). С. 57.
9. Лейви А. Я., Талала К. А., Яловец А. П. // Физика и химия обраб. материалов. 2011. № 4. С. 13.
10. Uglov V. V., Kvasov N. T., Petukhou Yu. A. et al. // 139-th TMS Annual Meeting & Exhibition Collected Proceedings. Supplemental Proceedings: Vol. 2: Materials Characterization, Computation, Modeling, Energy (Seattle, WA, USA, Febr. 14–18, 2010). The Minerals, Metals and Materials Society, Wiley, 2010. P. 633.
11. Uglov V. V., Kudaktsin R. S., Petukhou Yu. A. et al. // Appl. Surf. Sci. 2012. Vol. 258. P. 7377.
12. Аскерко В. В., Углов В. В., Черенда Н. Н. и др. // Взаимодействие излучения с твердым телом: Сб. науч. тр. 6-й Междунар. конф. (Минск, 28–30 сент. 2005 г.). Минск: БГУ, 2005. С. 200.
13. Егоров В. И. Применение среды COMSOL Multiphysics 4.2 для решения задач теплопроводности: Уч. пос. СПб: СПбГУ, 2006.
14. Кипарисов С. С., Левинский Ю. В., Петров А. П. Карбид титана: получение, свойства, применение. М.: Металлургия, 1987.
15. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
16. Самсонов Г. В., Вилицкий И. М. Тугоплавкие соединения: Справочник. М.: Металлургия, 1976.
17. Славинский М. П. Физико-химические свойства элементов. М.: Металлургиздат, 1952.
18. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. М.: Металлургия, 1989.
19. Leyvi A. Ya., Talala K. A., Yalovets A. P. // Proc. 10-th Intern. conf. on modification of materials with particle beams and plasma flows (Tomsk, Russia, Sept. 19–24, 2010). P. 173. URL: http://www.hcei.tsc.ru/conf/2010/cat/proc_2010.html [дата доступа 19.07.2010].
20. Асташинский В. М., Баканович Г. И., Минько Л. Я. // Журн. прикл. спектроскопии. 1984. Т. 40, № 4. С. 540.
21. Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высш. шк., 1984.
22. Uglov V. V., Remnev G. E., Kuleshov A. K. et al. // Surf. Coat. Technol. 2010. Vol. 204. P. 1952.
23. Uglov V. V., Kuleshov A. K., Soldatenko E. A. et al. // Ibid. 2012. Vol. 206. P. 2972.
24. Стальмашенок Е. К. Структурно-фазовые состояния и механические свойства слоев углеродистой стали, легированной металлами под действием компрессионных плазменных потоков: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск: БГУ, 2008.
25. Черенда Н. Н., Шиманский В. И., Углов В. В. и др. // Персп. материалы. 2012. № 3. С. 16.
26. Фридман А. М. // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, № 3. С. 225.
27. Панов В. С., Чувилин А. М. Технология и свойства твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСиС, 2001.

УДК 621.793 : 539.61

СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ Ti–N НА НЕЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ, ОБРАБОТАННОЙ ДУГОЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ГРАФИТОВЫМ АНОДОМ

© 2014 г. **Г. В. Потемкин, В. В. Демиденко, Е. П. Найден, М. В. Журавлев**

Институт физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Статья поступила в редакцию 11.03.2013 г., доработана 27.03.2013 г., подписана в печать 29.03.2013 г.

Г. В. Потемкин – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. лаборатории № 1 Института физики высоких технологий Томского политехнического университета (634028, г. Томск, пр-т Ленина, 2а). Тел.: (3822) 41-91-58. E-mail: ep.gvp@yandex.ru.

В. В. Демиденко – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. той же лаборатории. E-mail: v18m@vtomske.ru.

Е. П. Найден – докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры радиоэлектроники Томского государственного университета (634045, г. Томск, ул. Лыткина, 28). Тел.: (3822) 41-36-99. E-mail: naiden@elefot.tsu.ru.

М. В. Журавлев – аспирант, инженер-исследователь той же лаборатории № 1. E-mail: zhuravlev-misha@mail.ru.

Рассмотрена возможность получения защитных покрытий Ti–N на нелегированной стали, обработанной дугой низкого давления с графитовым анодом. Изучены морфология и структура покрытий. Исследован фазовый состав пленок. Определены физико-механические характеристики осажденных покрытий. Полученные данные свидетельствуют о необходимости осаждения покрытия в едином с очисткой вакуумном цикле при температуре подложки не менее половины ее температуры плавления.

Ключевые слова: подготовка поверхности, шероховатость, переходная зона, микротвердость, адгезия, покрытие, фазовые превращения.