

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ С ОХЛАЖДЕННОЙ МИШЕНЬЮ

А.В. Севрюк¹⁾, А.В. Пунько²⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, Тел. +375 17 2095512, e-mail: uglov@bsu.by

²⁾ Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники, 220013, ул. П. Бровки, 6, Минск, Беларусь, Тел. +375 17 2938613, e-mail: kvasov@bsuir.unibel.by

Исследованы особенности процесса взаимодействия плазмы с мишенью в условиях предварительного охлаждения последней. Выявлено экранирование теплового действия плазмы посредством формирования адсорбированного слоя на поверхности образца и предложен подход, позволяющий проводить оценку энергетических параметров плазменного потока. Проведен расчет поля температур в образце в процессе обработки и выявлены в зависимости от режимов обработки закономерности эволюции элементного и фазового состава и изменения физико-механических свойств поверхностных слоев материалов, формируемых под действием компрессионных плазменных потоков

Введение

Ранее проведенные исследования выявили зависимости эволюции морфологии и фазового состава от элементного состава мишени при воздействии на нее компрессионных плазменных потоков [1]. В связи со спецификой взаимодействия высокоэнергетической плазмы с поверхностью интерес представляло влияние на это взаимодействие наличия отрицательных температур на поверхности. Последнее потребовало, во-первых, проведения расчета температурных полей в образце в процессе обработки, влияющих на условия кристаллизации; а во-вторых, выявления закономерности эволюции морфологии поверхности и изменения физико-механических свойств модифицированных слоев в зависимости от начальных температурных режимов обработки.

Методика эксперимента

Объектами исследования являлась инструментальная сталь У8А (0.8 вес.% С). Обработка производилась компрессионной плазмой (плотность мощности $\sim 1.5 \cdot 10^5$ Вт/см² за импульс) в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре (МПК) компактной геометрии при различных начальных температурных режимах (в условиях нормальных (комнатных) и отрицательных температур на поверхности мишени).

Так как интерес представляло влияние различных начальных температурных режимов на структуру и механические свойства обрабатываемых образцов, был разработан и создан дополнительный модуль (система), обеспечивающий охлаждение образцов. Данная задача решалась путем использования жидкого азота для охлаждения мишени. Сосуд с жидким азотом располагается снаружи вакуумной камеры. Внутри камеры к вакуумно-изолированному выходу крепится г-образный медный стержень, на противоположном конце которого крепится образец. Геометрия стержней позволяет менять положение образца вдоль направления движения плазмы. Внешняя часть конструкции погружается в сосуд с жидким азотом, температура кипения которого составляет -190°C . Значения температур определялись термопарой медь-константан (тип Т), подключенной к измерителю напряжений термопар ИНТП-16. В системе охлаждения мишени, термо-

пара проведена к необрабатываемой стороне образца. Следует считать, что определяемая таким образом температура является начальной температурой образца до обработки. Разработанная система дает возможность охлаждать образцы до температуры $T = -100^\circ\text{C}$. Отметим, что передача теплоты идет по каналу теплопроводности, а рассеяние теплоты происходит за счет удаленности в пространстве образца (мишени) и места генерации холода.

Морфология поверхности и поперечные сечения образцов изучались с помощью растровой электронной микроскопии. Фазовый состав исследовался методом рентгеноструктурного анализа (РСА). Изучены механические свойства образцов: проведены фрикционные испытания и измерение микротвердости по Виккерсу.

Результаты и обсуждение

Анализируя процесс взаимодействия плазмы с охлажденной мишенью, в нем можно выделить два этапа в зависимости от объекта, на который воздействует КПП:

Одноимпульсный режим (первый этап): в результате наличия отрицательной температуры на поверхности образцов происходит конденсация паров из остаточной атмосферы (рис 1.а). При последующем действии импульса плазмы на данную систему наблюдается испарение адсорбированного слоя (рис 1.б).

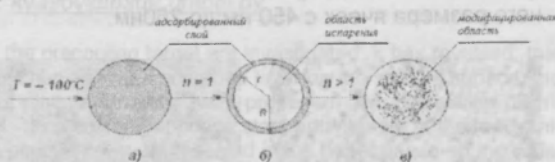


Рис. 1 Схематическое изображение процесса взаимодействия плазмы с охлажденной мишенью:
R – радиус образца, r – радиус испаренной области, n – число импульсов плазмы.

РЭМ изображение поверхности образца после воздействия плазмы свидетельствует об отсутствии морфологических изменений на поверхности, рентгено-структурный анализ не выявил изменений фазового состава приповерхностных слоев. Таким образом, наличие адсорбированного слоя экранирует тепловое воздействие плазмы на ми-

шень. При этом вся энергия плазменного потока расходуется на взаимодействие с адсорбированным слоем.

Энергия (без учета ионизации), необходимая для испарения области площадью $S = \pi r^2$ и высотой h рассчитывается по формуле:

$$Q = A r^2, \quad (1)$$

где $A = \rho_l \pi h ((C_l + C_w) \Delta T + q + p)$, ρ_l – плотность льда, C_l, C_w – теплоемкости льда и воды, соответственно, q, p – удельные теплоты плавления и парообразования воды.

Размер (радиус) испаренной области будет изменяться в зависимости от параметров плазменного потока. Таким образом можно оценивать энергетические характеристики плазмы при различных параметрах потока. В частности, для типичных параметров плазменного потока, энергия, оцененная предложенной методикой, составила $Q_{расч} = 53$ Дж (т.е. $1.7 \cdot 10^5$ Вт/см²), что вполне согласуется с экспериментально определенными значениями плотности мощности $1.5 \cdot 10^5$ Вт/см², полученными калориметрическими методами.

Таким образом, поддержание отрицательной температуры на поверхности, с одной стороны, дает возможность экранирования образца от теплового воздействия плазменного потока, с другой стороны, оценивать энергетические характеристики плазменного потока.

Многоимпульсный режим (второй этап) обуславливает воздействие плазмы непосредственно с поверхностью мишени и ведёт к структурно-фазовой и морфологической модификации приповерхностных слоев (рис. 1.в) путем расплавления и перезатвердевания приповерхностных слоев мишени.

РЭМ исследования поперечных сечений образцов выявили наличие модифицированного слоя толщиной до 20 мкм.

Рентгеноструктурный анализ показал формирование в образцах стали после обработки аустенита с преимущественной ориентацией (200).

РЭМ исследования морфологии поверхности показали, что при обработке в условиях предварительного охлаждения по сравнению с обработкой без охлаждения наблюдается переход от дендритной структуры на поверхности образцов (рис 2.а) к ячеистой (рис 2.б) и уменьшение среднего размера ячеек с 450 нм до 250 нм.

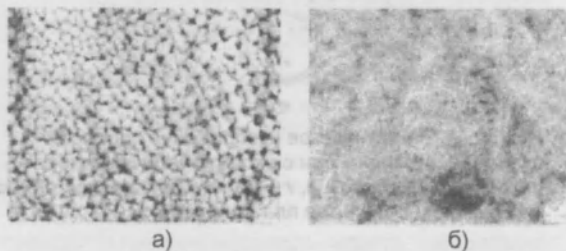


Рис. 2. РЭМ изображение поверхности образцов стали У8А, обработанных КПП а) без охлаждения, б) в условиях предварительного охлаждения

Полученные данные указывают на то, что введенное охлаждение изменяет условия кристаллизации расплава. Так как примеси имеют

ограниченную растворимость в твердой фазе и происходит их сегрегация и возникает концентрационное переохлаждение жидкости перед фронтом кристаллизации. В теории Маллинза и Секерки характерный размер ячеек d определяется как длина волны морфологической неустойчивости и является функцией градиентов концентраций G_c и температур G :

$$d = 2\pi \left(\frac{3I_m I'}{m G_c - \frac{1}{2} G} \right)^{1/2} \quad (2)$$

где градиент концентраций является линейной функцией скорости кристаллизации. Для определения последних величин и оценки вклада охлаждения в условия кристаллизации был проведен теоретический расчет полей температур.

Процесс взаимодействия плазмы с металлом описывался одномерным уравнением теплопроводности (3) со следующими начальными и граничными условиями (4): температура образца в начальный момент одинакова в различных его точках и равна T_0 , передняя сторона кристалла ($x=0$) соприкасается со средой (азотной плазмой), температура которой изменяется по заданному закону $\theta = \theta(t)$ (5), температура задней стороны кристалла, соприкасающейся с подложкой, неизменна со временем и равна температуре окружающей среды T_0 .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

где $T = T(x, t)$ – температура;

k – теплопроводность; c – теплоемкость; ρ – плотность.

$$T|_{x=0} = T|_{x=L} = T_0$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \lambda \cdot (T|_{x=0} - \theta(t)) \quad (4)$$

$$\theta(t) = \begin{cases} T_m, & t \leq \tau \\ T_0, & t > \tau \end{cases} \quad (5)$$

Решением уравнения (3) совместно с условиями (4,5) является распределение температуры по глубине образца в зависимости от времени процесса. (рис. 3).

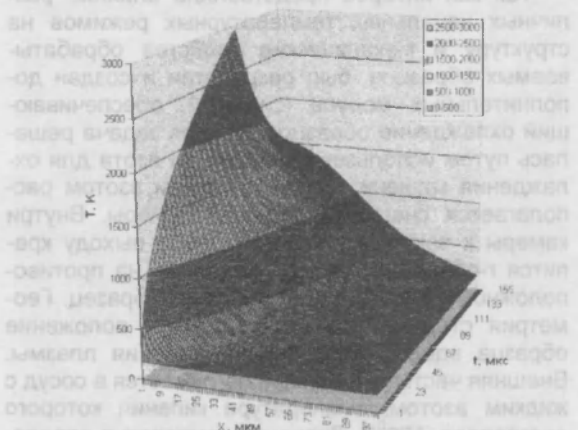


Рис. 3 Распределение температуры T по глубине x образца в зависимости от времени процесса t .

По данному распределению построена зависимость скорости движения границы жидкость–твердая фаза от времени процесса (рис. 4), которая отражает тенденцию в увеличении скорости кристаллизации при обработке в условиях охлаждения. Максимальная рассчитанная скорость, которой соответствует кристаллизация на поверхности, составляет 4м/с.

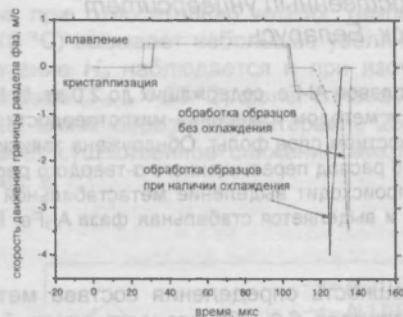


Рис. 4 Зависимости скорости движения границы раздела жидкость – твердая фаза от времени для различных начальных условий обработки

Так как при введении охлаждения элементный состав и концентрация примеси при различных режимах обработки сохранялись, поэтому изменение состояния обрабатываемых образцов объясняется, в основном, различиями в условиях кристаллизации. В условиях предварительного охлаждения ввиду большей скорости кристаллизации существует повышенная вероятность формирования большей плотности дефектов, обуславливающих искажения кристаллической решетки. РЭМ изображения поверхности свидетельствуют об увеличении плотности границ ячеек. Исследования ПЭМ [2] позволили выявить,

что граница ячеек представлена сеткой дислокаций, декорированных примесями. То есть введение охлаждения при обработке приводит к различиям в дефектной структуре, чем может объясняться изменение свойств приповерхностных слоев обработанных образцов. Проведенные в работе исследования выявили улучшение механических свойств приповерхностных слоев. Обработка в условиях предварительного охлаждения по сравнению с классической (обработкой без охлаждения) приводит к: повышению износостойкости и микротвердости в 1,5 - 2раза.

Заключение

В результате обработки стали высокотемпературной плазмой в условиях предварительного охлаждения мишени обнаружили, что наличие отрицательной температуры на поверхности образца экранирует тепловое действие плазмы. Установлено, введение охлаждения позволяет изменять условия кристаллизации и, тем самым, влиять на морфологию поверхности, а также улучшать механические характеристики модифицированных слоев.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.М. Кузьмицкому за содействие в разработке системы охлаждения.

Список литературы

1. V.V. Uglov, N.N. Cherenda, A.K. Stalmashonak, D.V. Dmitriev, A.V. Sevriuk. // V International conference plasma physics and plasma technology, September 18-22, 2006. Minsk, Belarus. – P.563-566.
2. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калин Б.А.
3. В.Л.Якушин. Перспективные радиационно-лучевые обработки металлов. – М.: Круглый год, 2001. –528 с.

THE INTERACTION OF COMPRESSION PLASMA WITH PRECOOLING SAMPLES

A.V. Sevriuk¹⁾, A.V. Punko²⁾

¹⁾ Belarussian State University, pr. Nezavisimosti 4, 220030 Minsk, Belarus.
Tel. +375 17 2095512. E-mail: uglov@bsu.by

²⁾ Belarussian State University Of Informatics And Radioelectronics,
6 P. Brouka str., 220013, Minsk, Belarus,
Tel. +375 17 2938613, e-mail: kvasov@bsuir.unibel.by

The special features of the process of interaction of plasma with the precooling target are investigated. It has revealed, that the screening of the heating effect of plasma takes place by means of shaping of the adsorbed layer on the sample surface, the approach giving the possibility to estimate the energy parameters of plasma flow has been proposed. The calculation of the temperature field in the sample during the time process is carried out. The evolution of phase state and change in the mechanical properties of surface layers, formed by the action of compression plasma flows are revealed in the dependence on the initial temperature regimes of treatment.