

ВЛИЯНИЕ УДАРНО-СЖАТОГО СЛОЯ НА МАССОПЕРЕНОС ПРИ ОБРАБОТКЕ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

А.Я. Лейви¹⁾, Н.Н. Черенда²⁾, В.В. Углов²⁾, А.П. Яловец¹⁾

¹⁾Южно-Уральский государственный университет,
пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия, leyvy@mail.ru

²⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь, Cherenda@bsu.by

В данной работе были проведены экспериментальные и численные исследования толщины ванны расплава и эрозии поверхности вещества при воздействии компрессионных плазменных потоков. Показано, что формирование ударно-сжатого слоя влияет на глубину проплава и унос массы с поверхности обрабатываемой мишени.

Введение

В настоящее время обработка материалов компрессионными плазменными потоками (КПП) с целью изменения их физических свойств, является одним из перспективных методов модификации конструкционных материалов. Такая обработка может приводить к увеличению прочности материала, изменению микрорельефа его поверхности, улучшению адгезии материала покрытия с материалом подложки, а также используется для легирования поверхности.

На данный момент накоплен большой эмпирический материал [1]. Проведенные теоретические исследования в [2, 3] позволили объяснить ряд экспериментально наблюдаемых фактов. Однако в рамках существующих представлений наблюдается значительное отличие результатов численных расчетов с экспериментальными данными, такими как количество массы, унесенной с обрабатываемой поверхности и глубина проплава.

Так, в работе [4] отмечается, что КПП с точки зрения функции энерговыделения, является поверхностным источником энергии и, как следствие, глубина проплава формируется за счет теплопроводности и составляет единицы микрометров. Экспериментальные данные, представленные в данной работе, показывают, что глубина проплава, в зависимости от режима обработки может составлять десятки микрометров. Также измеренный в данной работе унос массы с поверхности мишени оказывается меньше, чем результаты численных расчетов по программному комплексу BETA-IN [5].

Такое расхождение численных расчетов с экспериментальными данными можно объяснить тем, что в [5] не учитывается влияние давления плазмы на динамику приповерхностных слоев вещества.

В данной работе были проведены экспериментальные и численные исследования влияния ударно-сжатого слоя на массоперенос вещества и его влияние на процессы формирования глубины ванны расплава и эрозии массы с поверхности вещества. Как показано в [1, 2] при торможении плазмы на поверхности мишени образуется область повышенной плотности и давления, так называемый ударно-сжатый слой [1].

Результаты исследований

Объектами исследования являлись образцы стали ст.3. с размерами 50x50 мм и толщиной 3 мм. Геометрические размеры образцов были больше радиуса плазменного потока с учетом радиального разлета плазмы вдоль поверхности образца.

Обработка образцов проводилась компрессионным плазменным потоком, генерируемым в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии (МПК-КГ) [1, 3]. В проводимых экспериментах начальное напряжение на конденсаторной батарее составляло 4 кВ, длительность разряда ~ 100 мкс. Скорость плазменных образований компрессионного потока в МПК-КГ составляла $(4-7) \times 10^4$ м/с. Температура и концентрация электронов плазмы компрессионного потока составляла соответственно 1-3 эВ и $(4-7) \cdot 10^{17}$ см⁻³. Давление до 15 МПа.

Обработка плазменным потоком мишеней проходила в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанную вакуумную камеру заполняли рабочим газом, азотом, до давления 400 Па. Плотность поглощенной поверхностью образца энергии, согласно проведенным калориметрическим измерениям, составляла $W=10-35$ Дж/см². Следует заметить, что указанная плотность поглощенной энергии является усредненной по площади образца характеристикой, а также она не учитывает энергию, унесенную испаренной массой.

Измерение массы образцов до и после воздействия проводилось с помощью аналитических лабораторных весов ВЛА-200г-М с точностью определения ± 0.2 мг. Исследования состояния поверхности образцов выполнялись с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver Pro и профилометра-профилографа Протон МИЭТ модель 130.

Перед обработкой плазменным потоком образцы ст. 3 были отшлифованы. Поверхность образца в результате шлифовки приобрела вид параллельных борозд, глубина которых составляет порядка 1.5 мкм.

После обработки образцов КПП визуально заметно изменение состояния поверхности и можно выделить следующие области (рис. 1): 1) центральная область – та часть поверхности образца, на которую плазменный поток падает

нормально; 2) переходная область (область между 1 и 3) – та часть поверхности образца, на которой происходит радиальный разлет плазменного потока; 3) необработанная область – та часть образца, чья поверхность не претерпела модификации после обработки.

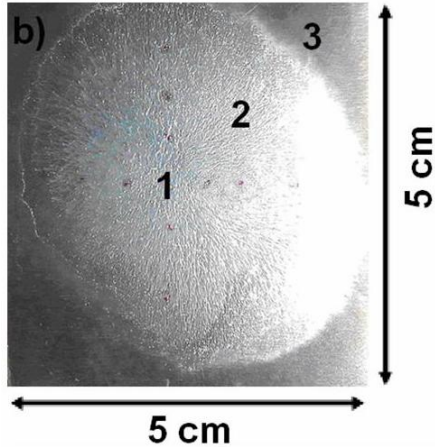


Рис. 1. Вид мишени после обработки КПП.

Численное исследование зависимости глубины проплава и унесенной массы с поверхности вещества от плотности поглощенной энергии было выполнено с помощью программного комплекса BETAIN [5]. Действие КПП на вещество учитывалось в виде теплового потока, так как КПП является поверхностным источником энергии.

На рис. 2. представлены результаты численных и экспериментальных исследований зависимости унесенной массы от плотности поглощенной энергии. Из рисунка видно, что результаты численных исследований удовлетворительно согласуются с экспериментом лишь при плотностях вложенной энергии, меньших 20 Дж/см^2 .

Глубина проплава, определенная экспериментально для плотности поглощенной энергии $W=20 \text{ Дж/см}^2$ достигает 20 мкм, в то время как численно рассчитанные значения, которые определяются только теплопроводностью, не превышают 5 мкм.

Такое расхождение экспериментальных фактов с численными расчетами может быть объяснено тем, что в численных расчетах не учитывается влияние ударно-сжатого слоя на динамику вещества при обработке КПП. На основании выше сказанного можно предположить, что при воздействии КПП на мишень, ее приповерхностные слои переходят из твердого состояния в жидкое, затем за счет давления, которое оказывает ударно-сжатый слой на мишень, ванна расплава вытесняется из области 1 в области 2 и 3. В случае, если геометрические размеры мишени меньше диаметра плазменного потока (геометрические размеры областей 1 и 2), то ванна расплава будет вытесняться за пределы мишени.

Вытеснение массы приводит к обнажению более глубоких слоев мишени, которые подвергаются воздействию КПП. Такая динамика нагрева мишени обеспечивает более глубокое расплавление мишени, чем только за счет теплопроводности. После окончания действия КПП на ми-

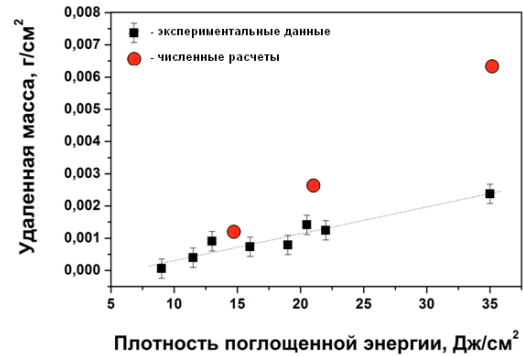


Рис. 2. Зависимость унесенной массы с единицы площади поверхности от плотности поглощенной энергии.

шень часть вытесненного расплава под действием сил поверхностного натяжения возвращается в область 1 в течение времени существования ванны расплава.

Если ударно-сжатый слой вытесняет расплав за границы мишени, то та часть расплава, которая не успела вернуться в область 1 к моменту кристаллизации, образует «наплыв» расплава на необработанную область.

На рис. 3 представлен профиль поверхности мишени для $W=20 \text{ Дж/см}^2$, сделанный с помощью профилометра (длина трека 1.2 см) после обработки КПП. Из рисунка видно, что от 0 до 4.5 мм наблюдается не обработанная часть поверхности (область 3). В области 2, от 4.5 до 8 мм, наблюдается «бруствер» высотой около 20 мкм. Далее идет впадина глубиной до 40 мкм. Подобный рельеф характерен для всех исследованных образцов.

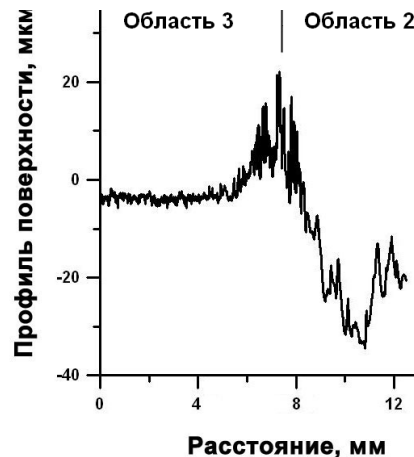


Рис. 3. Профиль поверхности образца после обработки КПП.

Таким образом, экспериментально было обнаружено, что ударно-сжатый слой вытесняет расплав на периферию (область 3).

С целью подтверждения предложенного механизма формирования представленного на рис. 3 рельефа поверхности было проведено численное моделирование влияния ударно-сжатого слоя на динамику расплава. С этой целью была использована модель [6] потенциального течения несжимаемой жидкости с учетом сил поверхностного натяжения в двумерной декартовой геомет-

рии. Ванна расплава задавалась как полубесконечная жидкость с абсолютно гладкой свободной поверхностью. Массовая плотность, коэффициент поверхностного натяжения и коэффициент вязкости были взяты из [7] для температуры расплава железа 1800 К. Линейные размеры системы задавались в соответствии с условиями эксперимента, результаты которого представлены на рис. 2. В расчетах динамика системы прослеживалась в течение 200 мкс, что соответствует времени существования расплава, причем давление ударно сжатого слоя учитывалось в течение времени действия КПП на мишень (80 мкс).

Расчеты показали, что на временах действия КПП наблюдается развитие капиллярных волн на поверхности мишени, после действия КПП наблюдался рост амплитуды возмущений за счет развития неустойчивости Рихтмайера-Мешкова до момента кристаллизации.

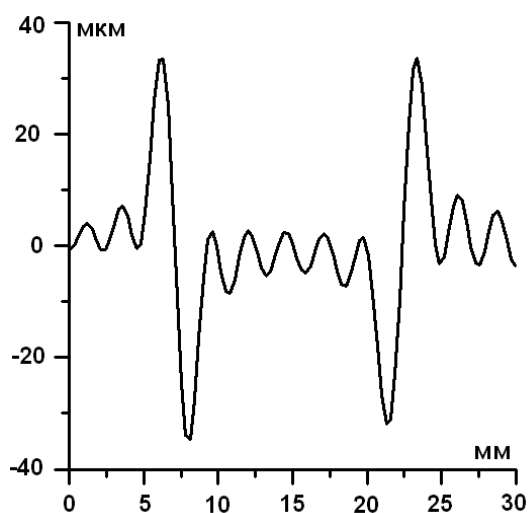


Рис. 4. Профиль поверхности образца после обработки КПП. Численный расчет.

На рис.4. представлен рассчитанный профиль поверхности мишени после обработки КПП. Из рисунка видно, что в результате воздействия КПП на вещество наблюдается волнообразный рельеф. При этом видно, что за счет давления, которое оказывает ударно-сжатый, слой формируется «бруствер» (область 2), что наблюдается экспериментально. Численные исследования показали, что ширина бруствера зависит от величины давления и линейных размеров области, на которую оказывает воздействие ударно-сжатый слой. Наблюдаемая амплитуда возмущений поверхности

на момент кристаллизации в зависимости от параметров (давление плазменного потока, время существования ванны расплава) составляет от 10 до 40 мкм, что совпадает с глубиной расплава наблюдаемой экспериментально.

Заключение

В работе были проведены экспериментальные и численные исследования влияния ударно-сжатого слоя на массоперенос вещества, на толщину ванны расплава и эрозию массы с поверхности вещества.

Было показано, что за счет давления, которое оказывает ударно-сжатый на мишень, ванна расплава вытесняется из центра пятна воздействия на периферию. В случае, если геометрические размеры мишени меньше диаметра плазменного потока, то ванна расплава будет вытесняться за пределы мишени. Такой подход позволяет объяснить экспериментально определенные величины толщины расплава и унесенной массы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (научно исследовательская работа ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), проводимая в рамках государственных заданий №1030 (№2014105-ГЗ))

Список литературы

1. Углов В.В., Черенда Н.Н., Анищик В.М., Асташинский В.М., Квасов Н.Т. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками. Минск: БГУ, 2013, 248 с.
2. Талала К.А., Лейви А.Я., Яловец А.П. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». 2012. Вып. 7. № 34 (293). С. 186–190.
3. Astashinski V.M., Leyvi A.Ya., Uglov V.V., Cherenda N.N., Yalovets A.P. // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2014. № 8(3), P. 519–523.
4. Лейви А.Я., Асташинский В.М., Черенда Н.Н., Углов В.В., Яловец А.П. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 12/3. С. 294–298.
5. Яловец А.П., Майер А.Е. // *Proceedings of 6-th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk. 23-28 September. 2002. P. 297-299.*
6. Leyvi A.Ya., Yalovets A.P., Krasnikov V.S. // *High Temperature Material Processes*. 2013. V.17, № 1. P. 15–23.
7. Физические величины. Справочник. Под редакцией Григорьева И.С., Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат. 1991. 1234 с.

THE INFLUENCE OF THE SHOCK-COMPRESSED LAYER ON THE MASS TRANSFER DURING COMPRESSION PLASMA FLOWS TREATMENT

A.Ya. Leyvi¹, N.N. Cherenda², V.V. Uglov², A.P. Yalovets¹

¹South-Ural State University, Physical Department,

Lenina 76, Chelyabinsk, 454080, Russia, leyvy@mail.ru

²Belarusian State University, 4, Nezavisimosti ave., Minsk, 220030, Belarus, Cherenda@bsu.by

Experimental and theoretical investigations of the thickness of the melt and surface erosion during compression plasma flows impact were carried out in this work. The findings showed that shock-compressed layer formation influenced on the thickness of the melt and mass removal from the surface of the treated target.