

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ВЕЩЕСТВОМ

А.Я. Лейви, К.А. Талала, А.П. Яловец

Аннотация

Обработка материалов интенсивными потоками плазмы широко используется для улучшения физических и химических свойств поверхности обрабатываемого объекта. Такая обработка способствует повышению механической прочности, износостойкости и коррозионной стойкости, уменьшает шероховатость поверхности материала, улучшает адгезию покрытия с подложкой, используется для легирования поверхности.

Результат обработки материала зависит от множества факторов. Прежде всего, это параметры плазменного потока (скорость, плотность, температура, состав) и длительность воздействия, исходное состояние поверхности обрабатываемого материала и его термодинамические свойства.

В данной работе разработана и реализована математическая модель взаимодействия интенсивных потоков плазмы с веществом.

Введение

При воздействии на вещество интенсивными потоками плазмы с плотностью мощности 10^5-10^8 Вт/см² наблюдается широкий круг разнообразных явлений, среди которых наибольший интерес сегодня вызывают генерация волн напряжения в объеме среды, изменение рельефа обрабатываемой поверхности (сглаживание поверхности, или наоборот, увеличение шероховатости), структурные и фазовые превращения в материале, массоперенос вещества.

Для описания взаимодействия плазменных потоков с веществом необходимо совместное решение системы уравнений, описывающих динамику плазменного потока, динамику облучаемой среды и уравнений, определяющих процессы на границе плазмы и твердого тела.

В данном случае наиболее приемлемым способом описания динамика плазменного потока является применение двухтемпературной одножидкостной модели [1] с учетом процессов радиационного переноса энергии.

Для описания динамики облучаемой среды здесь применяется модель упругопластических течений [2] совместно с широкодиапазонным уравнением состояния [3].

На контактной границе плазма-твердое тело для плазмы задается условие непроницаемости. На поверхности мишени давление определяется газодинамическим давлением плазмы, поток энергии от плазмы твердому телу – суммой теплового и радиационного потоков.

Данный подход позволяет рассчитать динамику облучаемой мишени при произвольном задании параметров плазменного потока.

Математическая модель

Взаимодействие плазменного потока с твердым телом характеризуется торможением налетающей на твердое тело плазмы и переходом ее кинетической энергии во внутреннюю энергию, что приводит к интенсивному росту ее температуры, плотности и давления. Рост температуры плазмы приводит к возрастанию роли радиационных процессов в переносе энергии.

При описании динамики плазмы используется приближение идеальной невырожденной плазмы, что справедливо для технологических режимов обработки, где температура достигает нескольких тысяч кельвинов. Будем рассматривать динамику плазмы в рамках двухтемпературной одножидкостной модели [1] с учетом процессов радиационного переноса энергии в осесимметричной цилиндрической геометрии.

Полная система уравнений, в эйлеровых переменных имеет вид [4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla (P^{(i)} + P^{(e)}) + \operatorname{div} \Pi; \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U^{(e)}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) U^{(e)} \right) = -p^{(e)} \operatorname{div}(\vec{v}) + \nabla \vec{q}^{(e)} + \rho Q^{(ei)}(\rho, T^{(e)})(T^{(i)} - T^{(e)}) + D_r; \quad (3)$$

$$\rho \dot{U}^{(i)} = -p^{(i)} \frac{\dot{V}}{V} + \rho Q^{(ei)}(\rho, T^{(i)})(T^{(e)} - T^{(i)}); \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U^{(i)}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) U^{(i)} \right) = -p^{(i)} \operatorname{div}(\vec{v}) + \rho Q^{(ei)}(\rho, T^{(i)})(T^{(e)} - T^{(i)}) + \Pi_{ik} v_{ik}. \quad (5)$$

Здесь (1) – уравнение непрерывности; (2) – уравнение движения; (3) и (4) – уравнение для энергии электронов и ионов соответственно; ρ, \vec{v} – массовая плотность и массовая скорость среды; $P^{(e)}, P^{(i)}$ – электронное и ионное давления; $\Pi_{ik} = 2\eta v_{ik}$ – тензор вязких напряжений (ионный), $U^{(e)}, T^{(e)}, U^{(i)}, T^{(i)}$ – внутренняя энергия и температура электронной и ионной компонент; $\vec{q}^{(e)} = -\kappa^{(e)} \nabla T^{(e)}$ – тепловой поток, обусловленный электронной теплопроводностью; $Q^{(ei)}$ – коэффициент, характеризующий скорость обмена энергией электронов и ионов; D_r – функция радиационного нагрева (охлаждения), представляющая собой разность между поглощенной и испущенной энергиями излучения в единице объема в единицу времени, явный вид функции приведен в [4].

Коэффициенты электронной теплопроводности $\kappa^{(e)}$ и обмена энергией в электронно-ионных столкновениях $Q^{(ei)}$, находились по формулам [5].

Уравнения состояния для электронной и ионной компонент имеют вид:

$$P^{(e)} = \bar{Z} \frac{R}{\mu} \rho T^{(e)} = (\gamma^{(e)} - 1) \rho (U^{(e)} - U_{ion}), \quad (6)$$

$$P^{(i)} = \frac{R}{\mu} \rho T^{(i)} = (\gamma^{(i)} - 1) \rho U^{(i)}, \quad (7)$$

где $\gamma^{(e)}, \gamma^{(i)}$ – показатели адиабат электронного и ионного газа, μ – масса киломоля, R – газовая постоянная, U_{ion} – энергия ионизации среды, \bar{Z} – средний заряд иона.

Средний заряд иона рассчитывался приближенным методом [6]:

$$U_{ion} = \frac{N_A}{\mu} \int_0^{\bar{Z}} I(q) dq.$$

Потенциалы ионизации для многозарядных ионов и электронные конфигурации были взяты из [7].

Численные исследования

Численные исследования воздействия плазменного потока на твердотельную мишень показали, что передача энергии мишени осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе при столкновении плазменного потока с мишенью происходит передача импульса плазменного потока твердому телу. Кроме того, давление плазмы на контактной границе и поток тепла от горячей плазмы к твердому телу может приводить к возникновению течений. Так как массовая плотность твердого тела много больше массовой плотности плазмы, то непосредственная передача импульса плазмы твердому телу (как при ударе) не вызывает у него существенного ускорения. Давление в налетающем плазменном потоке мало (≈ 10 МПа) и тоже не может вызвать интенсивного движения в твердом теле. Из-за большой разницы плотностей плазмы и твердого тела и, как следствие, большой разницы удельных теплоемкостей контактирующий с твердым телом плазменный слой быстро остывает, а внутренняя энергия твердого тела меняется незначительно. Таким образом, начальный этап взаимодействия плазмы с твердым телом характеризуется незначительным изменением термодинамических параметров облучаемой среды.

Следующий этап взаимодействия плазменного потока с твердым телом характеризуется торможением налетающей на твердое тело плазмы и переходом ее кинетической энергии во внутреннюю, что приводит к интенсивному росту ее температуры, плотности и давления. На данном этапе происходит увеличение плотности энергии плазмы вблизи поверхности твердого тела.

Увеличение плотности энергии в плазме приводит к интенсивному разогреву поверхности твердого тела. Возросшее на контактной границе дав-

ление плазмы, а также разогрев поверхности твердого тела за счет потока тепла и лучистой энергии приводит к формированию волны сжатия (слабой ударной волны), распространяющейся вглубь твердого тела. Конкурирующим процессом передачи энергии плазмы твердому телу является радиальная разгрузка плазменного потока, а также унос энергии из объема плазмы за счет излучения.

Выводы

Таким образом, торможение плазмы при взаимодействии с твердым телом приводит к превращению ее кинетической энергии во внутреннюю с последующим испусканием электромагнитного излучения. Передача энергии плазменного потока твердому телу осуществляется за счет:

- а) радиационного воздействия;
- б) давление плазменного потока;
- в) теплового потока.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № П2526 от 20 ноября 2009 г. и РФФИ (проект № 10-08-00251-а).

Библиографический список

1. Брагинский, С.И. Вопросы теории плазмы / С.И. Брагинский; под ред. М.А. Леонтовича. – М.: Госатомиздат, 1963. – Вып. 1.
2. Уилкинс, М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / М.Л. Уилкинс. – М.: Мир, 1967. – 384 с.
3. Колгатин, С.Н. Интерполяционные уравнения состояния металлов / С.Н. Колгатин, А.В. Хачатурьянц // ТВТ. – 1982. – Т. 20, № 3. – С. 90–94.
4. Лейви, А.Я. Динамика поверхностных слоев мишени при воздействии плазменными потоками / А.Я. Лейви, К.А. Талала, А.П. Яловец // 17-я Зимняя школа по механике сплошных сред. – Пермь, 2011.
5. Брагинский, С.И. Вопросы теории плазмы / С.И. Брагинский; под ред. М.А. Леонтовича. – М.: Госатомиздат, 1963. – Вып. 1. – 191 с.
6. Яловец, А.П. Расчёт течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц / А.П. Яловец // ПМТФ. – 1997. – Т. 38, № 1. – С. 151–166.
7. Calculated ionization potentials for multiply charged ions / Tomas A. Carlson, C.W. Nestor, Jr., Neil Wasserman and J.D. McDowell. – ATOMIC DATA, 1970. – Vol. 2. – P. 63–99.