

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГРАДИЕНТНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ САМОФЛЮСУЮЩЕГО СПЛАВА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ТВЕРДЫМИ ТУГОПЛАВКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ПОД ИМПУЛЬСНЫМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Н.П. Мацука, Г.Ф. Громько, А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко

Нанесение износостойких покрытий эффективно для улучшения эксплуатационных свойств деталей трибосопряжений. При этом широкое применение находят покрытия из самофлюсующихся сплавов системы Ni Cr B Si. Цель работы – исследование возможности повышения работоспособности трибосопряжения путем формирования градиентного газотермического покрытия на основе самофлюсующего сплава, модифицированного твердыми тугоплавкими соединениями карбида титана (Ti C).

Формирование градиентных покрытий осуществляется последовательно. На подложку газотермическим способом наносятся слои толщиной 0,2 мм: порошок сплава Ni Cr B Si, затем Ni Cr B Si+20% Ti C и окончательно Ni Cr B Si+40% Ti C. С помощью высокоэнергетической обработки нанесенного материала импульсами плазмы происходит его уплотнение [1]. Циклический нагрев и оплавление с последующим сверхбыстрым охлаждением промежуточных слоев приводит к измельчению структуры и формированию аморфных фаз композиционного покрытия.

Для моделирования нестационарных тепловых процессов при формировании покрытия каждый из перечисленных слоев представим в виде структурированной среды, по аналогии с работой [2]. Композиционный состав Ni Cr B Si опишем сплошной средой, в которой равномерно распределены упрочняющие частицы-включения Ti C, размер зерен которых порядка 1–2,5 мкм. Исходя из заданного процентного соотношения карбида титана определяем расстояние между включениями Ti C. Как показали численные расчеты [2], такое представление среды более перспективно для описания тепловых процессов в покрытии, поскольку учитывает особенности структуры и локальные изменения теплопроводности в исходной системе.

Распространение тепла в образце опишем уравнением баланса энергии в декартовой системе координат при предположении изотропности среды. Математическая модель тепловых процессов представляет собой краевую задачу для нелинейного уравнения теплопроводности с граничными условиями теплообмена на боковых поверхностях образца, условием теплообмена с излучением на верхней границе образца (с учетом гауссова распределения температуры от оси плазменной струи [1] и расстояния до образца) под воздействием плазменной струи или условием теплообмена при отсутствии воздействия, а также с условиями сопряжения на границе контакта разных материалов.

Для построения численного алгоритма использовали метод конечных объемов [3]. Дискретизацию области расчета осуществляли по аналогии [2] с первоначальным разбиением области на ячейки в соответствии со структурой каждого слоя покрытия.

Рассматриваемая модельная система сеточных ячеек представляет собой двумерную структуру взаимодействующих частиц, расположенных в ячейках сеточной области. Методом контрольного объема построена неявная разностная схема для внутренних ячеек области. Для граничных ячеек и сеточных узлов на границах области аппроксимационные неявные схемы получены с учетом основного уравнения на границах области и соответствующих граничных условий, что обеспечивает второй порядок аппроксимации по пространству. Для граничных угловых ячеек аппроксимация проводилась с учетом соответствующих смежных граничных условий. Необходимость выбора неявной схемы и построения итерационного процесса для ее решения продиктована спецификой процесса, в частности, возникновением значительных градиентов температуры в покрытии. Использование явных схем для устойчивого решения потребовало бы слишком жесткие ограничения на соотношения сеточных шагов. Решение находили рекуррентно по временным слоям с переменным шагом по времени, величина которого варьировалась в зависимости от числа итераций.

Предлагаемая методика моделирования нестационарных тепловых процессов используется при разработке модели прогнозирования остаточных напряжений в композиционных градиентных покрытиях на основе самофлюсующегося сплава. Это позволит оценить уровень остаточных напряжений, которые оказывают существенное влияние на работоспособность износостойких покрытий, являющихся объектом исследования.

Литература

1. Ильющенко, А. Ф., Оковитый А. В., Шевцов А. И. *Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий*. Мн.: Бестпринт, 2007.
2. Gromyko G. F., Matsuka N. P., Shevtsov A. I., Ilyuschenko A. Ph. *Mathematical modeling of self-propagating high-temperature synthesis in formation of a wear-resistant coating by pulse plasma processing of a composite plaster involving shs reagents* // J. High Temperature Material Processes. 2016. V. 20 (1). P. 59–83.
3. Патанкар, С. В. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости*. М.: Энергоатомиздат, 1984.

