

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА «ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОЕ ПОКРЫТИЕ/ПОДЛОЖКА» ПРИ ХОЛОДНОМ ПЕРЕНОСЕ МЕТАЛЛА**Невский С.А.¹, Сарычев В.Д.¹, Коновалов С.В.¹, Осинцев К.А.², Громов В.Е.¹**¹ *Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия*² *Самарский национальный исследовательский университет им С.П. Королева, Самара,**Россия*snevskiy@bk.ru

Исследовано формирование рельефа поверхности раздела «высокоэнтропийное покрытие/подложка» при холодном переносе металла с позиций представлений о возникновении на границе раздела гидродинамических неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. На основе этих представлений создана математическая модель формирования данного рельефа. Она включает в себя уравнения Навье-Стокса, начальные и граничные условия. Эволюция поверхности раздела изучалась с помощью метода фазового поля, в основе которого лежат уравнения Кана-Хилларда. Решение полученной системы уравнений осуществлялось с помощью метода конечных элементов. Для верификации предложенной математической модели была проведена серия экспериментов по нанесению высокоэнтропийных покрытий Co–Cr–Fe–Mn–Ni на подложку из алюминиевого сплава АМг5. Режим нанесения покрытия: скорость подачи проволоки 13 м/мин, сила тока ~100 А, напряжение 22 В, индуктивность 3 Гн, скорость перемещения горелки 200 мм/мин, длина слоя 50 мм, угол наклона горелки 10 градусов, направление наплавки "от себя" - (углом вперед). Методами сканирующей электронной микроскопии было установлено, что Граница раздела имеет волнообразный вид, обусловленный вихревым течением материалов. Наличие крупных фрагментов покрытия в подложке свидетельствует о фрагментации вихря. Размеры фрагментов покрытия в подложке (~ 46 – 180 мкм) показывают, что гидродинамические неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора проявляется в этом диапазоне длин волн.

Установлено, что наличие только одной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца не дает адекватного объяснения формирования волнообразного рельефа поверхности «высокоэнтропийное покрытие/подложка». Учет ускорения слоя (неустойчивости Рэлея-Тейлора), занимаемого покрытием из сплава Co–Cr–Fe–Mn–Ni, качественно изменяет картину взаимного перемешивания материалов. При значении поперечной скорости слоя 50 м/с и вертикальной составляющей ускорения 10^7 м/с². формирование вихрей начинается при $t > 4$ мкс, а их распад на капли происходит в интервале от 8,4 мкс до 22,5 мкс. При $t > 22,5$ мкс начинается процесс интенсивного перемешивания. При отличной от нуля горизонтальной составляющей ускорения слоев ($a_y/a_x \sim 0.5$) фрагментация вихрей будет происходить в интервале от 16,5 мкс до 23 мкс, а интенсивное перемешивание вещества слоев начинается при $t > 23$ мкс. Показано, что в этих условиях расчётная конфигурация границы раздела «покрытие/ подложка» соответствует наблюдаемой в эксперименте. Размеры образовавшихся частиц составляют от 57 до 127 мкм, что приближенно соответствует экспериментальным данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 20-19-00452)