

ФОРМИРОВАНИЕ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ ПОКРЫТИЕ-ПОДЛОЖКА, ПОДВЕРГНУТОЙ ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

А. В. Севрюк

Применение концентрированных потоков энергии определяет широкие перспективы для модификации поверхностных свойств материалов [1, 2]. Обработка сопровождается нагревом поверхности выше температуры плавления с последующим быстрым охлаждением. Исследование проблемы затвердевания металлов и металлических сплавов ведет к разработке теоретических схем и моделей для оценки протекающих процессов. Целью работы являлось выявление влияния потоков плазмы на изменение морфологии поверхности, формирование ячеистой структуры; изучение факторов, влияющих на размеры ячеек.

Объектом исследования являлись образцы низкоуглеродистой стали 3 (0,2 вес.% C), на которые было нанесено покрытие Mo толщиной ~1 мкм вакуумно-плазменным методом (сила тока 100А, опорное напряжение - 120 В). Направленные плотные азотные плазменные потоки были получены с помощью магнитоплазменного компрессора [3]. Компрессионный плазменный поток (КПП) устойчиво существует ~100 мкс, плотность энергии, поглощаемой поверхностью образца за один импульс, составляла ~15 Дж/см². Для исследований морфологии поверхности использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) марки LEO1455VP.

Во время действия импульса плазмы происходит расплавление покрытия и поверхностного слоя подложки, а затем жидкофазное перемешивание этих слоев. Как только действие импульса прекращается, происходит остывание и перезатвердевание перемешанной системы. Проведенные РЭМ исследования показали, что на поверхности обработанных КПП образцов закалка из расплава при высоких скоростях охлаждения обуславливает формирование ячеистой поверхностной структуры (рис. 1). В большинстве случаев ячейки имеют шестигранную форму, подобную гексагональной, и их средний размер составляет ~500 нм.

Переохлаждение на межфазной границе является необходимым условием роста кристалла. Состав раствора обогащен компонентами, вытолкнутыми растущим кристаллом в случае коэффициента распределения (захвата) примеси $k < 1$, в процессе роста в жидкости вблизи кристаллизующейся поверхности появляется слой, обогащенный примесью, температура на фронте роста оказывается меньше, чем в остальной области, и жидкость перед фронтом кристаллизации переохлаждена. Этот эффект известен под названием «концентрационного переохлаждения» [4].

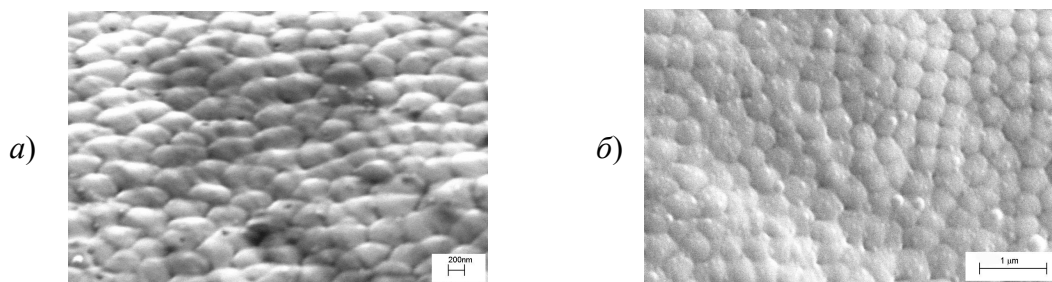


Рис. 1. РЭМ изображение ячеистой структуры, сформированной на поверхности обработанных образцов: а) сталь, б) молибден-сталь

Если градиент температуры G у фронта больше, чем градиент равновесной температуры затвердевания, то считается, что поверхность кристаллизации стабильна. Критерий устойчивости фронта имеет вид [5]:

$$\frac{GV}{D} > m\Delta C, \quad (1)$$

где m – наклон линии ликвидуса на фазовой диаграмме, D – коэффициент диффузии в жидком состоянии, V – скорость роста, ΔC – скачок концентраций на фронте кристаллизации.

Нарушение происходит тогда, когда дестабилизирующее действие перераспределения примеси преобладает над стабилизирующим действием термических градиентов в системе. Согласно критерию, фронт роста кристалла должен становиться нестабильным при условии

$$G < \frac{-mC_0(1-k)V}{kD}, \quad (2)$$

где C_0 – концентрация примеси в жидкой фазе вдали от границы.

Нестабильность, связанная с концентрационным переохлаждением, приводит к образованию ячеистой структуры [4]. Размер ячеек в первом приближении определяется величиной D/V , используя данные из [6, 7], получаем 30 нм, что не согласуется с экспериментом. Поэтому далее следует обратиться к теории неустойчивости границы раздела.

В теории возмущения [8] проблема морфологической неустойчивости решается путем добавления к модели концентрационного переохлаждения, поверхностного натяжения и переноса тепла через границу. Возмущение на границе жидкость/твердая фаза дается выражением:

$$z = \delta \exp(\sigma t + iw_x X + iw_y Y), \quad (3)$$

где δ – амплитуда возмущения в начальный момент времени. Граница неустойчива, если действительная часть в экспоненте положительна для любых возмущений [4]. Величина σ была определена Маллинзом и Се-

керкой путем решения уравнений теплопроводности и диффузии с граничными условиями переохлажденного слоя. Длина волны морфологической неустойчивости:

$$\lambda_m = 2\pi / \omega_{\min}, \quad (4)$$

где $\omega_{\min}$ – частота возмущения [4]. Неустойчивость наступает тогда, когда дестабилизирующий эффект значительно превышает действие градиентов температур и поверхностного натяжения. Это выглядит так: $V/2k \ll \omega$. Различные способы нахождения величины ω предложены авторами работ [4, 8, 9].

Будем рассматривать исследуемую сталь, как квазибинарный сплав. Для расчета характерного размера кристаллической структуры используется подход, который базируется на решении проблемы тепломассообмена при кристаллизации с дополнительным условием морфологического отбора характерного размера структуры – гипотеза маргинальной устойчивости [10], согласно которой отбираемый масштаб структуры равен наименьшей длине волны морфологической неустойчивости Маллинза-Секерки [8]. Градиент концентраций определяется как:

$$G_c = -\frac{(1-k)VC_0}{kD}. \quad (5)$$

И в этом случае может быть получено соотношение, определяющее характерный размер структуры d :

$$d = 2\pi \left(\frac{3T_m \Gamma}{mG_c - \frac{1}{2}G} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где T_m – температура плавления, Γ – капиллярная константа.

При использовании приведенной системы, был вычислен характерный размер структуры. Полученное значение, используя данные [6, 7], составляет 590 нм, что показывает хорошее соответствие с экспериментальными данными.

Все предыдущие модели рассматривались при условии исключения конвекции. Вещество жидкости может переноситься из одной точки в другую гидродинамическим потоком. Т.о. существуют объективные основания полагать, что гидродинамическую неустойчивость можно рассматривать и как дополнительное условие, включаемое в предыдущие концепции, и с позиции самостоятельного факта, определяющего состояние системы. Рассмотрим возникновение движения в жидкости, приводящее к организованному движению упорядоченных потоков в пространстве. Предположим, что причиной движения в горизонтальном слое

жидкости может быть градиент давлений. В процессе плавления образца происходит скачок плотности на $d\rho$, что приводит к появлению дополнительного давления dp внутри жидкости из-за сжатого объема dv :

$$dp = \frac{d\rho}{\rho\theta}, \quad (7)$$

где θ – сжимаемость.

Будем также предполагать, что жидкость движется в элементарном цилиндре радиуса R , используя уравнение Навье-Стокса и уравнение непрерывности получим:

$$R = \frac{2\sigma\theta\rho}{d\rho}. \quad (8)$$

Полученный радиус составляет 10^{-8} м. Если ввести частоту пространственной организации $\omega = (2R)^{-1}$ и далее в теории неустойчивости использовать ее как известную величину, с учетом гипотезы маргинальной неустойчивости размер структуры получится $d = 140$ нм. Дополнительный учет гидродинамических потоков в рассмотренных выше моделях может обеспечить перераспределение примеси в жидкой фазе и влиять на пространственную организацию возмущения на границе жидкая-твердая фаза.

Литература

1. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. М. Поута, Г. Фоти, Д. К. Джекобсона. М., 1987.
2. Kalin B. A., Yakushin V. L., Vasiliev V. I. et. al. Use of high temperature pulsed plasma fluxes in modification of metal materials // SCT. 1997. V.96. P. 110–116.
3. Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А.И.Морозова. Мн., 1974.
4. Narayan J. Interface instability and cell formation in ion-implanted and laser-annealed silicon // J. Appl. Phys. 1981. V. 52 (3). P. 1289–1293.
5. Федоров П. П. Морфологическая устойчивость фронта кристаллизации бинарных твердых растворов вблизи точек минимумом и максимумов на кривых ликвидуса // Неорганические материалы. 2001. Т. 37. №1. С. 95–103.
6. Физические величины: Справочник / Под ред. А. П.Бабичева, Н. А. Бабушкиной, А. М. Братковского и др. М., 1991.
7. Черенда Н. Н., Углов В. В., Асташинский В. М. и др. Модификация элементного и фазового состава быстрорежущей стали P18 компрессионным плазменным потоком // Вакуумная техника и технология. 2005. Т. 35. №1. С. 29–35.
8. Sekerka R.F. Morphological stability // J. Cryst. Growth. 1968. V. 3/4. P. 71–81.
9. Sato T., Shibata K., Ohira G. Interfacial wave of maximum growth velocity at the morphological instability of the planar solid-liquid interface in the solidification of alloys // J. Cryst. Growth. 1977. V. 40. P. 69–77.
10. Галенко П. К., Хараждевский Е. В., Данилов Д. А. Высокоскоростная кристаллизация конструкционной стали при лазерной обработке поверхности // Журнал технической физики. 2002. Т. 72. Вып. 5. С. 48–55.