

"Сейфуллин оқулары – 14: Жастар, ғылым, инновациялар: цифрландару - жаңа даму кезеңі » атты Республикалық ғылыми-теориялық конференциясының материалдары = Материалы Республиканской научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения – 14: Молодежь, наука, инновации: цифровизация - новый этап развития». - 2018. - Т.1, Ч.2. – С. 77-81

Исследование вопросов лазерного напыления многокомпонентными материалами

*Есекеев А.М., магистрант
Хан В.А., к. т. н., ст. преподаватель
Аймурзинов Ж.К., магистр, ассистент*

Поверхность определяет многие свойства твердых тел, начиная от их внешнего вида и заканчивая прочностью. Не вызывает сомнения значение структуры и свойств поверхностей и приповерхностных слоев твердых тел для науки и техники. Можно привести многочисленные примеры из таких областей знаний, как катализ, получение полупроводников, металлургия. Каталитические свойства определяются составом поверхности и ее структурой. В полупроводниках электрические свойства зависят от состава и структуры поверхностного слоя толщиной 1 мкм. Износостойкость и коррозионная стойкость металлов также определяются составом и структурой поверхностных слоев. Из приведенных примеров ясно, что технологические процессы, позволяющие регулировать или перестраивать поверхностные слои, имеют большое будущее. В течение последнего десятилетия были разработаны новые способы модифицирования поверхностных слоев. Во-первых, сегодня мы можем получать лазерные и электронные пучки энергией, достаточной для разогрева и оплавления больших участков поверхности за весьма короткое время. Скорости нагрева и охлаждения при использовании импульсных лазеров достаточно высоки для образования новых метастабильных сплавов, что позволяет говорить о появлении нового способа осуществления быстрого роста кристаллов.

Установлено, что при длительном облучении мишени, представляющей собой сплав с однородным распределением компонентов по объему, достигается равновесное состояние, при котором состав потока распыляемых атомов, равен химическому составу объема сплава [1].

Явление преимущественного распыления в сплавах обусловлено также различием в энергии связи поверхностных атомов. Подробный анализ исследования преимущественного распыления дан в работе, посвященной распылению многокомпонентных металлов [2]. Здесь отмечают, что многие результаты по изменению состава приповерхностных слоев облучаемых материалов являются следствием не только и даже не столько преимущественного распыления, сколько одновременного действия распыления и вторичных эффектов.

Поверхность сплава, содержащего n компонентов, распыляется со

скоростью

$$v = j \times \sum_{k=0}^n \omega_k Y_k - j\omega_0 = j\alpha, \quad (1)$$

где j —плотность потока распыляющих ионов; ω_k — парциальный атомный объем k -й компоненты сплава, а ω_0 и Y_0 — соответственно парциальный атомный объем и выход распыляющих ионов. Второе слагаемое в уравнении (1) представляет собой вклад имплантированных распыляющих ионов в предположении, что в направлении, нормальном к поверхности, успевают пройти их полная релаксация. Суммарная скорость накопления компоненты i в слое $0 \leq X \leq X_0$ выражается соотношением

$$\frac{dN_i}{dt} = j \left[C_i^b \times \left(\frac{\alpha}{\Omega^b} \right) - Y_i \right], \quad (2)$$

где C_i^b и Ω^b — соответственно атомная концентрация компоненты i и средний атомный объем для данного сплава. Первое слагаемое соответствует увеличению количества атомов вещества i в плоскости $x = x_0$ при перемещении слоя в объем со скоростью v , а второе — их потере за счет распыления. Результирующая скорость накопления имплантированных ионов определяется уравнением

$$\frac{dN_0}{dt} = j[1 - Y_0], \quad (3)$$

в котором не учитывается отражение ионов. При достижении равновесного состояния выражения, заключенные в уравнениях (2) и в фигурные скобки, обращаются в нуль. Таким образом, в равновесном состоянии

$$Y_1:Y_2:Y_3 = C_1^b:C_2^b:C_3^b, \quad (4)$$

$$Y_0 = 1, \quad (5)$$

т. е. *отношение концентраций компонентов в распыляемом потоке оказывается таким же, как в объеме материала.* Это совершенно точный результат и важно понимать, что в установившемся режиме поток распыленных атомов не содержит информации о преимущественном распылении и о вторичных процессах, обусловленных изменениями состава мишени под действием распыления.

Отметим, что C_i^s — концентрация i -й компоненты, полученная усреднением по всей области образования распыленных атомов, и, следовательно, сильно смещенная к первому и второму атомным слоям [3]. Глубина вылета электронов в низкоэнергетической электронной спектроскопии сравнима с глубиной, на которой происходит распыление, поэтому данный метод лучше всего подходит для определения

коэффициентов распыления исходя из равновесной концентрации элементов на поверхности твердого тела. Приемлемым методом является также спектроскопия рассеянных ионов (СРИ), которая дает информацию прежде всего о самом верхнем слое.

При условии, что рассеивающие ионы, внедрившись в сплав, оказываются достаточно сильно связанными, полную вероятность их распыления можно выразить через равновесную поверхностную концентрацию:

$$p_0 = 1/C_0^s, \quad (6)$$

Ранее экспериментально была показана возможность изменения состава поверхностных слоев сплавов при облучении. Последнее десятилетие отмечено возрастающим интересом к исследованию распыления многокомпонентных материалов. Обзор работ в этой области приведен в [4].

При избирательном распылении вероятность покинуть поверхность для атомов одной из компонент сплава оказывается выше. Вместе с тем каскадное перемешивание обеспечивает однородность состава в пределах так называемого слоя измененных свойств, толщина которого приблизительно равна проективному пробегу ионов. По мере обеднения состава поверхностного слоя легкой распыляемой компонентой устанавливается равновесное состояние, при котором состав потока распыляемых атомов соответствует исходному составу сплава. Эта простая модель вполне удовлетворительно описывала ряд экспериментальных наблюдений. Однако вскоре стало ясно, что для установления равновесия во многих случаях требуется значительно большее время, чем предсказывает теория, а глубина слоя с измененными свойствами намного превосходит расчетную, особенно при повышенных температурах [5]. В настоящее время известно, по крайней мере, пять различных механизмов изменения состава приповерхностного слоя в процессе распыления: преимущественное распыление; имплантация атомами отдачи и каскадное перемешивание; радиационно-стимулированная диффузия; адсорбция Гиббса и радиационно-стимулированная сегрегация. Относительный вклад перечисленных механизмов в изменение состава потока распыляемых атомов и концентрационные профили элементов мишени зависят от типа сплава, температуры, примесей, энергии и плотности потока распыляющих ионов. В настоящее время достигнуто определенное понимание упомянутых выше механизмов. Однако систематических исследований распыления с учетом всех возможных механизмов и их взаимовлияния не проводилось. В этой связи актуальным вопросом является проведение анализа различных механизмов распыления в рамках простых физических моделей и определение условий их проявления. Опытными образцами целесообразно выбирать металлические сплавы, для которых образование дефектов и распыление не сопровождается процессами ионизации. Особое значение в понимании процессов имеют изменения в составе мишени, которые, в свою очередь, связаны с составом потока распыленных частиц. Это в первую очередь угловая зависимость состава

потока распыленных частиц и явление развития поверхностной шероховатости, в частности, образования конусов распыления.

Остаются открытыми вопросы изучения отдельных процессов, влияющих на изменение состава приповерхностного слоя при распылении. Следует отметить, что на сегодня возможность реализации каждого из процессов подтверждена экспериментально и в некоторой степени обоснована теоретически. Однако их относительное влияние на процесс распыления поверхности не всегда может быть установлен. Ранее были получены результаты исследований нетермических процессов, т. е. процессов, не требующих термической активации (преимущественное распыление, имплантация атомами отдачи, перемешивание), а также процессов, в которых термическая активация является важным компонентом (радиационно-стимулированная диффузия, адсорбция Гиббса, радиационно-стимулированная сегрегация). Установлено, по крайней мере, шесть различных процессов, сопровождающихся изменением состава: преимущественное распыление, имплантация атомами отдачи, каскадное перемешивание, радиационно-стимулированная диффузия, адсорбция Гиббса и радиационно-стимулированная сегрегация. Взаимодействие отдельных процессов делает радиационно-стимулированное изменение состава достаточно сложным явлением. Все перечисленные процессы в той или иной степени изучены экспериментально и теоретически. Подчас это изучение не связано с распылением (например, исследование термической сегрегации и радиационных эффектов в твердых телах). Таким образом, сложность вопроса заключается в том, что специальных работ по исследованию модификации поверхностей при распылении выполнено сравнительно мало, нет однозначного понимания всех его составляющих.

Проще всего описать распыление при низких температурах, когда работают только нетермические процессы, т. е. преимущественное распыление, имплантация атомами отдачи и каскадное перемешивание. В сплаве с первоначально однородным составом преимущественное распыление одной из компонент, перераспределение компонент за счет имплантации атомами отдачи и внедрения распыляющих ионов приводят к формированию слоя измененного состава. Равновесное состояние в мишени устанавливается после распыления поверхности на глубину, в несколько раз превосходящую толщину слоя измененных свойств. Толщина слоя примерно равна проективному пробегу распыляющих ионов, а концентрационные профили определяются каскадным перемешиванием.

При повышении температуры увеличивается подвижность радиационных дефектов и параметры слоя с измененным составом (кинетика образования, протяженность, концентрационные профили) определяются адсорбцией Гиббса, радиационно-стимулированной диффузией и сегрегацией. Эти процессы, требующие термически активируемого движения дефектов, могут вызывать нестационарные, направленные противоположно равновесным, изменения состава поверхностных слоев. В равновесном состоянии состав поверхности всегда определяется преимущественным распылением и

объемным составом. Глубина измененного слоя при повышенных температурах может на порядки превосходить проективный пробег ионов. Механизм явления связан с радиационно-стимулированной диффузией и сегрегацией, распространяющимися на слои, расположенные на глубине, значительно превышающей область зарождения дефектов. Увеличение толщины модифицированного слоя вызывает возрастание времени установления равновесного состояния. На сегодня более менее раскрыта физическая суть процессов, ответственных за изменение состава приповерхностных слоев. Вместе с тем еще далека возможность проведения надежных количественных расчетов. Основной причиной является недостаток информации, во-первых, о таких необходимых для расчета параметрах, как энергия образования, движения и связи дефектов, а во-вторых, о процессах образования различных видов дефектов, определяющих интенсивность и глубину развития радиационно-стимулированной диффузии и сегрегации. Ограниченность имеющейся информации в данной области накладывает определенные трудности в изучении процессов напыления металлических деталей. Сложность и многочисленность механизмов изменения состава и структуры поверхностных слоев при распылении позволяют в некоторой степени управлять указанными характеристиками, меняя входные параметры. Химический состав напыляемого вещества влияет на относительную величину скорости распыления и образования дефектов, а также на величину области нарушений. Температура оказывает влияние на время жизни дефектов и, следовательно, на интенсивность радиационно-стимулированной диффузии и сегрегации границе за счет радиационно-стимулированной сегрегации [6]. Широкие возможности в выборе энергии, материала, массы и скорости набора дозы имплантируемых ионов, температуры процесса и послеимплантационного отжига позволяют оптимизировать необходимые свойства поверхности. Наличие таких возможностей важно с точки зрения выбора заданной модификации поверхности при распылении.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н., Основы лазерного термоупрочнения сплавов, Москва «Высшая школа», 2000 г.
2. Лосев В.Ф., Физические основы лазерной обработки материалов: учебное пособие, Изд-во Томского политехнического университета, 2011 г.
3. Дж.М. Поут, Г. Фот, Д.К. Джекобсон, Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками, Москва «Высшая школа», 1987 г.
4. А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров, Технологические процессы лазерной обработки, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006 г.
5. Huang C.J., Yan X.C., Chen C.Y., Xie Y.C., Liu M., Kuang M., Liao H.L., Additive manufacturing hybrid Ni/Ti-6Al-4V structural component via

- selective laser melting and cold spraying, Vacuum, Vol. 151, May 2018, Pages 275-282
6. Yin S., Yan X., Chen C., Jenkins R., Liu M., Lupoi R., Hybrid additive manufacturing of Al-Ti6Al4V functionally graded materials with selective laser melting and cold spraying, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 255, May 2018, Pages 650-655.
 7. Huang, C.J. Email Author, Yan, X.C. , Chen, C.Y.Email Author, Xie, Y.C, Liu, M. , Kuang, M., Liao, H.L Additive manufacturing hybrid Ni/Ti-6Al-4V structural component via selective laser melting and cold spraying(Article). Volume 151, May 2018, Pages 275-282.
 8. Engineering for Rural Development– издательство Thomson Reuters 2012. – 147 с.
 9. 1.Sarkar, Maykh; Shaw,Rakesh Kr.; Gosh,Subrata Kr.; Numerical analysis of stresses in mine excavator bucket, JOURNAL OF MINING SCIENCE,2015, vol.51, pp.309-313.