

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДИНАМИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ С ХИМИЧЕСКИМ МАССОПЕРЕНОСОМ

¹Классен Н.В., ¹Классен Е.Н., ^{1,2}Мышляев М.М., ³Клубович В.В., ⁴Кулак М.М.,

³Хрущев Е.В., ⁵Хина Б.Б., ⁶Суров В.А.

¹ИФТТ РАН, г. Черноголовка, Россия

²ИМЕТ РАН, г. Москва, Россия

³БНТУ, г. Минск, Беларусь

⁴ИТА НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь

⁵Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

⁶Физ-мат лицей, г. Сергиев Посад, Россия

Проблема создания материалов с заданными свойствами, актуальная ранее для разного рода конструкций, с середины прошлого века стала актуальной для микро- и оптоэлектроники [1,2]. В данной работе мы показываем, что для решения этих проблем совсем не обязательно привлекать дорогие и технические сложные методики. Используемые в нашем случае способы динамического деформирования в сочетании с несложными химическими процедурами, с одной стороны, просты, доступны и не дороги, но, с другой стороны, дают весьма обнадеживающие результаты. В наших первых публикациях на эту тему описывались результаты применения шариковой обкатки для улучшения характеристик металлических изделий, что касалось не только традиционных механических свойств, но и химической и радиационной стойкости, а также оптических параметров[3]. Повышение микротвердости металлов обкаткой обычно трактуется как результат резкого возрастания плотности структурных дефектов в приповерхностном слое, сильно тормозящих движение дислокаций. Но с этой точки зрения, казалось бы, становится парадоксальным снижение потерь отраженного света подвергнутыми обкатке зеркалами, т.к. те же структурные дефекты должны активно рассеивать электроны проводимости. Но электронно – микроскопические и рентгенодифракционные исследования структуры поверхностных областей после обкатки в совокупности с акустическими измерениями упругих модулей в этих областях позволили устранить это кажущееся противоречие. Оказалось, что определенные режимы обкатки не просто создают в приповерхностном слое многократно повышенную концентрацию дефектов типа дислокаций и их агломератов, но и формируют регулярную нанокристаллическую структуру с размерами зерен порядка 100 нм и меньше. Существенное отличие таких наноструктур от поликристаллических материалов – в том, что границы между нанозернами обладают достаточно высоким кристаллическим совершенством и поэтому гораздо слабее рассеивают электроны по сравнению с границами в поликристаллах.

Степень сверхструктурного упорядочения как профиля обкатываемой поверхности, так и внутренней морфологии приповерхностного слоя определяется большим количеством поддающихся регулировке параметров – скорости движения обкатывающего инструмента, силы давления его на поверхность, радиуса кривизны шарика или ролика и т.д. [3]. В данном случае важно, что имеется обширный набор возможностей управления характеристиками поверхности и приповерхностного слоя. Например, сравнительно просто поддается регулировке периодичность и глубина модуляции профиля поверхности. При этом генерируются акустические колебания определенной частоты (рис. 1).

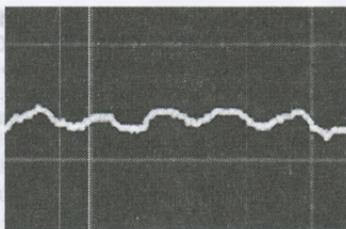


Рисунок 1 – Осциллограмма акустического излучения, генерируемого при обкатке пластины алюминия шариком диаметром 20 мм со скоростью 0,5 м/сек. Зарегистрированный период колебания излучаемого звука составляет 0,0003 сек.

Излучение регулярных акустических колебаний при обкатке обусловлено образованием, перераспределением и аннигиляцией структурных дефектов, генерируемых в приповерхностном слое. Обнаруженное на обкатанных металлах уменьшение упругих модулей в приповерхностном слое является кажущимся и обусловлено тем, что границы между нанозернами образованы дислокациями, не загрязненными примесями. Под действием внешней нагрузки эти дислокации относительно легко выгибаются, а при ее снятии – легко возвращаются назад. Такой процесс, по существу, не консервативен, т.к. при движении дислокаций часть энергии от внешней нагрузки все-таки переводится в тепло (и это проявляется в возрастании динамических потерь, регистрируемых динамически). Но так как прогнувшиеся дислокации после снятия нагрузки возвращаются на исходные позиции, макроскопически это воспринимается как упругое деформирование с пониженным модулем.

Установленное на нескольких видах материалов повышение химической стойкости поверхностей кристаллов, прошедших обработку обкаткой или другими приемами деформационной полировки [3], можно объяснить формированием нанозеренной структуры в приповерхностном слое. Во-первых, создание в этом слое остаточных сжимающих напряжений снижает вероятность соединения атомов основного вещества с инородными химическими элементами, которые должны повышать удельный объем. Второй фактор – формирование наноскопической гладкости поверхности. За счет этого плотность поверхностных ступенек, ямок и других дефектов значительно уменьшается, что резко снижает вероятность захвата поверхностью инородных атомов и молекул из внешней среды. Третий фактор химической пассивации обкатанных поверхностей – уже обсуждавшееся выше лучшее кристаллическое качество границ между нанозернами. По этой причине энергетический стимул химического соединения с инородным веществом у атомов нанограницы значительно слабее, чем у атомов границ в поликристаллах, которые вследствие своей нерегулярности и загрязненности инородными примесями имеют гораздо более высокую внутреннюю энергию, предрасполагающую атомы этой области кристалла к реакциям с «инородцами».

Как уже указывалось выше, дислокации в нанограницах не загрязнены примесями и не утратили своей подвижности. Поэтому локальное динамическое деформирование приповерхностной области (например, шариковой обкаткой или локальным воздействием ультразвукового излучателя) приводит к активным перестройкам структурных дефектов в приповерхностных областях, что выражается в распространении волн пластической деформации и интенсивном акустическом излучении. Наши наблюдения распределения процесса деформации по глубине, проведенные с помощью поляризационно-оптического микроскопа на модельном монокристалле иодида цезия, выявили эллипсообразные перемещения масс, распространяющиеся при шариковой обкатке на глубину в несколько сотен микрон. Такого рода траектории массопереноса, упругих деформаций, магнитного и электрического полей обычно присущи поверхностным волнам акустической или

электромагнитной природы, переносящим энергию поверхностных воздействий внутрь материала [4]. В нашем случае было обнаружено, что при нанесении на поверхность деформируемого кристалла слоя красящего вещества шариковая обкатка поверхности индуцирует быстрый массоперенос этого вещества на глубину, на несколько порядков выше обычных диффузионных масштабов. Это можно объяснить, по крайней мере, двумя причинами: дислокации, мигрирующие в пластической волне от поверхности в глубину, переносят захваченные ими примеси и, кроме того, примеси сами собой активно перемещаются по сверхструктуре дислокационных рядов гораздо быстрее, чем это происходит при диффузии по регулярной атомарной решетке.

Практическое значение многократно ускоренного локальной деформацией химического массопереноса, способного создавать на макроскопических масштабах требуемые состав и структуру материалов, распространяется на обширный набор технических применений. Например, обкатка нелегированной стали с нанесенной на поверхность суспензией молекул тефлона привела к тому, что эти молекулы надежно закрепились в приповерхностной области (в отличие от слабого закрепления на тефлоновых сковородах) и обеспечили водоотталкивающие свойства стали (рис. 2).



Рисунок 2 – Слева: капли воды на стальном лезвии, подвергнутом «сухой» обкатке. Справа: капли на другом участке того же лезвия после обкатки с тефлоном, создавшей гидрофобный эффект.

В данный момент мы экспериментально изучаем импрегнирование приповерхностных областей металлов веществами, которые обычно используются для их объемного легирования (хром, никель, углерод, азот и т.д.). Эта методика во много раз экономичнее традиционных технологий легирования, цементации и других приемов, требующих специальных условий (высоких температур, особого состава окружающей атмосферы и др.). Не требуется нагрева или создания специальной среды. Кроме экономичности, преимущество еще в том, что обработка конструкций может производиться автономно в полевых условиях. Это, например, важно для коррозионной защиты мостов, трубопроводов, морских судов и т.д. Водоотталкивающий эффект обкаточного тефлонирования, помимо антикоррозионной защиты стальных конструкций, может быть весьма полезен для антиобледенительной обработки проводов электропередач, самолетов и других изделий из алюминия. Еще важно подчеркнуть, что усиление массопереноса достигается не только обкаткой, но и локальной акустической обработкой достаточной интенсивности. Следует отметить, что такого рода динамическое легирование может быть эффективно при создании разного рода полупроводниковых устройств, конструкций с градиентными материалами и т.д.

Работа частично выполнена при поддержке РФФИ № 16058–00132 Бел_a

Сисок литературы:

- 1 Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники – 2-е изд., дополненное – («Мир материалов и технологий»)/Мартинес– Дуарт Д.М., Мартин–Палма Р.Д., Агулло–Руеда Ф., Изд-во ТЕХНОСФЕРА РИЦ, 2009. – 368 стр.
2. Материаловедение полупроводников и диэлектриков, Горелик С.С., Дашевский М.Я. Изд-во МИСиС, 2003. – 480 стр.
3. Классен Н.В., Кобелев Н.П., Колыванов Е.Л., Орлов В.И., Шмытько И.М., Клубович В.В., Кулак М.М. Материаловедение. –2013. –№11. –С.19–24.
4. В.И. Каганов. Колебания и волны в природе и технике. Горячая линия, 2008 г. – 336 стр.