

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ, ДЕФОРМИРУЕМЫХ
ОБКАТКОЙ ШАРИКОМ**

¹Классен Н.В., ¹Кобелев Н.П., ^{1,2}Мышляев М.М., ³Клубович В.В.,
³Кулак М.М., ⁴Хина Б.Б.

¹ИФТТ РАН, г. Черноголовка, Россия

²ИМЕТ РАН, г. Москва, Россия

³ИТА НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь

⁴Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Россия

Исследования последних десятилетий показали, что интенсивная пластическая деформация металлов при определенных условиях (в том числе и шариковая обкатка) образует в них нанокристаллическую структуру, причем пространственное распределение дислокаций и других структурных неоднородностей во многих случаях характеризуется высокой степенью периодичности. Такая периодичность объясняется двумя факторами: статическим – рекристаллизационной перестройкой системы дислокаций, введенных при деформировании, с образованием малоугловых границ, и динамическим – самоорганизацией движущихся дислокаций в периодические наноструктуры для выполнения одного из основных принципов неравновесной термодинамики – минимизации производства энтропии. Просвечивающая электронная микроскопия металлов после деформации такого рода показывает хорошую периодичность модуляции плотности дислокаций, происходящей в микроскопическом и мезоскопическом масштабе, и наноскопическое распределение отдельных дислокаций в границах и сетках, также обладающее хорошей периодичностью. Такого рода периодические наноструктуры из отдельных дислокаций можно отнести к новым экспериментальным объектам, перспективным как с точки зрения поиска новых физических явлений, так и для широкого круга практических применений. Например, наноразмерные сетки дислокаций имеют резонансные частоты в области от гигагерц до терагерц, создавая новую ситуацию для поведения акустических фононов [1]. При движении такая сетка будет излучать фононы определенного набора частот, которые создадут с резонансными колебаниями дислокаций связанные состояния подобно тому, как в полупроводниках и металлах создаются связанные состояния электронов и фотонов (поляритоны в полупроводниках и плазмоны в металлах). Эти объединенные состояния дислокаций с фононами должны своеобразно проявляться и в теплопроводности, и в комбинационном рассеянии света, и в электронно-колебательных взаимодействиях. В спектрах электронных состояний при значениях волновых векторов, совпадающих с векторами обратной решетки сетки дислокаций, должны появляться особенности, заметно влияющие на электронные и оптические свойства кристаллов [2].

К настоящему моменту уже известны несколько особенностей свойств металлов, подвергнутых шариковой обкатке, которые можно отнести на счет формирования периодических наноструктур в их приповерхностных слоях. Так, коэффициенты отражения света меди и алюминия после шариковой обкатки увеличиваются так, что соответствующая доля световой энергии, теряемая при отражении, снижается в полтора раза. Такое улучшение оптических свойств можно сопоставить с явлением гигантского комбинационного рассеяния, наблюдаемого на органических молекулах в том случае, когда они расположены на наношероховатой поверхности металла при определенном размере шероховатостей. Это усиление объясняется тем, что плазмоны, которые возбуждаются падающей световой волной в приповерхностном слое металла, взаимодействуют с неровностями поверхности резонансным образом, так что амплитуда электрического поля световой волны у поверхности возрастает многократно. Этим и объясняется существенное увеличение интенсивности комбинационного рассеяния света [3].

С другой стороны, поверхность металла после шариковой обкатки в оптимальном режиме является зеркально гладкой и описанные выше резонансы на неровностях формироваться не могут. Но приповерхностный слой имеет нанокристаллическую структуру, причем границы между нанокристаллитами сформированы периодически распределенными дислокациями. Такое периодическое распределение дислокаций и,

соответственно, решеточного потенциала способно индуцировать пространственную модуляцию электронных параметров кристалла. А пространственно промодулированная электронная подсистема может, в свою очередь, вступить в резонансное взаимодействие со световыми волнами, отчасти подобное взаимодействию с нанощероховатостями непосредственно на поверхности, усиливающее световое поле. С микронеоднородностями приповерхностного слоя свет завязывать резонансы не может из-за небольшой глубины проникновения. Но наноразмерные неоднородности будут прокачиваться светом на всю глубину, усиливая при определенных соотношениях между масштабами наноструктуры и длиной волны света коэффициент оптического отражения.

В образовании наноструктурированного приповерхностного слоя при шариковой обкатке меди и алюминия мы убедились с помощью сканирующей электронной микроскопии. На микрофотографии (рис.1,а) торцового края дорожки проката поверхности алюминия отчетливо видны наноразмерные зерна и намечено направление, в котором происходила обкатка. При меньшем увеличении (рис.1,б) нанозерна видны хуже, но зато отчетливо проявляется периодическая структура нанобороздок вдоль направления обкатки.

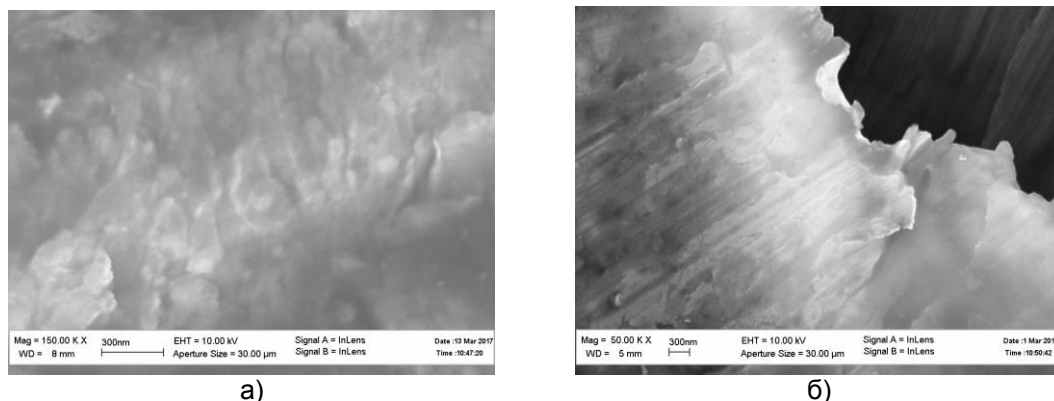


Рисунок 1 – Наноструктура торца дорожки прокатки с разными увеличениями

Образование нанозерен размерами порядка 30 нм и нанобороздок, параллельных направлению обкатки и образующих периодическую систему, позволяет сформулировать новую версию процесса деформационного массопереноса при шариковой обкатке. Такой способ интенсивного деформирования отличается от равноканального углового прессования и кручения с прессованием изначально большими градиентами деформации и напряжения как в радиальном, так и в тангенциальном направлении относительно обкатывающего шарика. Такая неоднородность способствует образованию сильно запутанной дислокационной системы, движение которой, необходимое для деформационного массопереноса, должно происходить с большими энергозатратами на внутреннее трение. Но такая ситуация не согласуется с одним из основных принципов неравновесной термодинамики – минимума производства энтропии, т.к. трение вызывает нагрев и, соответственно, увеличение энтропии. Для минимизации трения и снижения производства энтропии запутанная дислокационная система должна стать упорядоченной. Это упорядочение может произойти, например, за счет объединения дислокаций в подвижные периодические сетки и границы нанозерен с периодическим же распределением дислокаций. Наноскопические размеры зерен определяются величиной градиента деформации (больше градиент – меньше зерно). Тогда массоперенос может производиться перекачкой зерен и перемещением сетки как стабильного целого. При этом отдельные дислокации внутри сетки или внутри нанограницы будут излучать фононы, как и в неупорядоченной системе. Но в периодической системе дислокаций фононы, излученные одной дислокацией, будут резонансно поглощаться соседней, поэтому потерь энергии на трение не будет. Так что математически обоснованный школой Пригожина принцип минимума производства энтропии [4,5] приобретает в данном случае материальное значение. Деформируемая

система для минимизации производства энтропии будет путем флуктуаций подбирать оптимальные размеры и структуру и в конечном итоге стабилизируется на определенном наборе параметров регулярной структуры.

Стабилизированная в процессе динамического деформирования сверхструктура после остановки может видоизмениться, найдя положение метастабильного минимума энергии, но сохранит образованную деформированием регулярность. Таким образом сформируется «квазикристалл», стремящийся при относительно небольших внешних воздействиях вернуться в свое метастабильное состояние. Подобной метастабильностью наноструктур, созданных шариковой обкаткой, можно объяснить их усиленную химическую стойкость, т.к. любое изменение состояния системы, в том числе и химическое, будет выводить ее из метастабильного равновесия. В этом смысле нанограницы действуют противоположно границам между микрозернами в обычных поликристаллах. Такие границы имеют нерегулярную структуру, заведомо повышающую внутреннюю энергию. Поэтому и механические, и химические воздействия на эти границы не приводят к заметному повышению свободной энергии и поэтому межзеренные границы являются слабыми зонами поликристаллов. Наряду с повышением химической стойкости еще одним свидетельством повышения метастабильности приповерхностной наноструктуры является наблюдение кажущегося снижения упругих модулей. Это обусловлено тем, что при измерениях модулей по скорости звука акустические воздействия вызывают не только упругую деформацию решетки, но и деформацию дислокационных сеток. Эта деформация является квазипластической и поэтому проявляет снижение сопротивления. Но это снижение сопротивления, вызванное по существу пластическими процессами, воспринимается как упругое за счет снижения модуля, т.к. дислокации в силу стабильности своей сверхструктуры возвращаются к исходным положениям.

Таким образом, шариковая обкатка является эффективным, технологичным и экономичным способом создания регуляризированных наноструктур посредством интенсивного деформирования. В отличие от равноканального углового прессования и кручения с прессованием этот способ интенсивного деформирования не только не требует сложного оборудования, но и применим как к пластичным, так и к непластичным материалам типа полупроводников и диэлектриков, т.к. за счет присущих этому способу сильно локализованных деформаций можно избегать хрупкого разрушения, создавая при этом в приповерхностном слое интересные для исследований и практических применений наноструктуры.

Список литературы:

1. В.Л. Инденбом, В.И. Альшиц., УФН, т. 115, № 1, с.4, 1975
2. Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, ФТП, т.8, № 4, с. 707, 1971
3. И.Р. Набиев, Р.Г. Ефремов, Г.Д. Чуманов, УФН, т. 154, № 3, с. 459, 1988
4. И. Пригожин, Д. Кондепуди. «Современная термодинамика», М., «МИР», 2002,
5. Г.А. Малыгин, УФН, т. 169, № 9, с. 979, 1999