

## ПОВЕДЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА И ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В МЕДИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ШАРИКОВОЙ ОБКАТКЕ

Колыванов Е.Л., Кобелев Н.П.

Институт физики твердого тела РАН

г. Черноголовка, Россия, E-mail: kolyvan@issp.ac.ru

Важное место среди методов интенсивной пластической деформации (ИПД) металлических материалов занимают методы обработки поверхности. В данной работе проведено исследование влияния обкатки шариком, как возможная альтернатива широко известному методу ИПД, как равноканальное угловое прессование (РКУП). Если основные (важные для практического применения) свойства поверхности после обкатки будут близки к аналогичным свойствам материала после РКУП, то это даст существенные технологические и экономические преимущества в получении материалов с такими улучшенными характеристиками, так как обкатка шариком требует гораздо более простого оборудования и позволяет обработать более широкий спектр форм и размеров металлических изделий, чем методика РКУП.

Ранее нами было установлено [1], что в случае медных и алюминиевых образцов твердость приповерхностного слоя после обкатки сравнима с твердостью материалов, подвергнутых РКУП. Кроме того, улучшаются химическая стойкость поверхности, а коэффициент интегрального оптического отражения для меди возрастает с 45% до 52–55%. В меди после РКУП наблюдается эффект сильного понижения упругих модулей [2–4] (до 10–15% по модулю сдвига), который обусловлен формированием в процессе обработки специфической зернограничной структуры. Существование такого эффекта в материале после шариковой обкатки будет свидетельствовать о схожести характера структуры после такой обработки. Поэтому целью настоящей работы было исследование упругих характеристик и внутреннего трения в материале, подвергнутом шариковой обкатке.

В качестве материала для исследования была выбрана поликристаллическая техническая медь (чистотой 99,95%). Образцы для обкатки представляли собой диски диаметром ~40 мм и толщиной 2 мм, которые перед обработкой подвергались отжигу при 600К в течение 2 часов. Обработка проводилась стальным шариком диаметром 20 мм при силе давления 8 кг и скорости поперечной подачи 12.5 м/мин на оборот. Диаметр пластического отпечатка при движении шарика составлял ~0,1 мм, т.е. за один проход поверхность образца подвергалась воздействию шарика ~8 раз. Обработке были подвергнуты обе стороны дисков.

Для исследования внутреннего трения и упругих свойств из дисков электроискровой резкой вырезались образцы размерами ~2x2x30 мм. Поэтому только две из четырех боковых поверхностей исследуемых образцов были обработаны обкаткой. Кроме того из не подвергавшихся обкатке дисков были вырезаны контрольные образцы таких же размеров. Измерения внутреннего трения и модуля сдвига образцов проводились в вакууме на частоте около 40 Hz методом обратного крутильного маятника [5] в диапазоне температур от ~100 до 600 К. Относительное изменение модуля сдвига определялось по относительному изменению квадрата резонансной частоты образца ( $G(T)/G_0 = f^2(T)/f_0^2$ ). Температурные зависимости снимались в процессе нагрева образцов с постоянной скоростью ~1.5 K/min. Было обнаружено, что обработка приводит к понижению модуля сдвига и появлению дополнительного затухания, которые исчезали после нагрева образцов до 600К. На рисунке для примера приведены температурные зависимости деформационных вкладов в декремент затухания  $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$  и в изменение модуля сдвига (дефект модуля)  $\Delta G/G = (G_2 - G_1)/G_0$  в образце, подвергнутом четырехкратной обкатке ( $\delta_1$ ,  $G_1$  и  $\delta_2$ ,  $G_2$  – значения соответствующих величин при первом и повторном нагревах, соответственно). Как видно, вклад в изменение модуля сдвига в низкотемпературной области несколько растет с повышением температуры, сопровождаясь при этом достаточно выраженными пиками внутреннего трения. Эти релаксационные пики

(деформационные пики внутреннего трения или пики Хасигути [6]) связывают с взаимодействием дислокаций и закрепляющих их собственных точечных дефектов. При повышении температуры происходит термоактивированное открепление дислокаций от таких дефектов, что приводит к увеличению дислокационного вклада в модуль сдвига, т.е. понижению модуля. В районе комнатной температуры величина этого вклада составляет ~ 3.5%. При повышении температуры выше 320–350 К начинаются процессы дислокационного возврата (релаксации дислокационной структуры и закрепления дислокаций дефектами), в результате чего дислокационный вклад в модуль сдвига исчезает. Эти процессы сопровождаются диссипацией энергии, что проявляется в появлении дополнительного затухания.

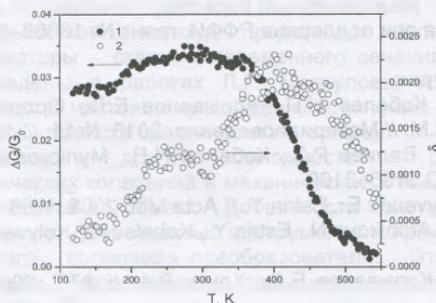


Рисунок 1 – Деформационный вклад в изменение модуля сдвига (1) и декремента затухания (2) в образце меди, подвергнутом четырехкратной обкатке.

Сравнительно малый вклад низкотемпературных релаксационных процессов в величину деформационного понижения модуля сдвига при комнатной температуре характерен для меди после интенсивной пластической деформации методом РКУП [3,7]. Однако, есть и отличие – после РКУП характерные величины изменения модуля сдвига в меди составляют порядка 10% [2,3,7]. В нашем случае эти величины составили чуть более 2% после однократной обкатки и около 3.5% после четырехкратной. Нужно, однако, отметить, что в результате РКУП проходит деформация всего объема материала, а в случае обкатки деформационному воздействию подвергается только приповерхностный объем образца. По нашим оценкам глубина проработки материала при обкатке не превышала 200–300 мкм. Также надо учесть и то, что обработке были подвергнуты 2 из 4 поверхностей образца. С учетом этого поправочный коэффициент наблюдаемого дефекта модуля составляет примерно 3 – 4, т.е. мы получаем те же характерные значения (около 10%), что и после обработки РКУП. Температурные зависимости затухания и дефекта модуля при температурах выше 320–350К в меди, подвергнутой обкатке, практически аналогичны их поведению в образцах после РКУП (в меди технической чистоты или со специально введенными примесями [2–4,7]. В этом смысле можно говорить о большой степени идентичности получаемых структур при деформации методом РКУП и методом обкатки шариком.

Здесь надо отметить, что наблюдаемый эффект понижения модуля сдвига не связан с изменением текстуры, т.к., как показали рентгенодифракционные исследования, соотношение интегральных интенсивностей линий рентгеновской дифракции на разных углах не менялась до и после нагрева образцов до 600К. Это согласуется с данными [4], где было показано, что изменение модуля сдвига в меди после РКУП в области температур до ~550–600К связано с эффектом аномального понижения упругих модулей, а не с изменением текстуры.

Завершая сравнение двух методов ИПД – РКУП и обкатки шариком, укажем, что проведенные нами в рамках этой работы исследования параметров структуры

рентгенографическим методом показали, что области когерентного рассеяния имеют размер  $\sim 75\text{--}100$  нм, а величина среднеквадратичных деформаций составляет  $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ , что полностью соответствует аналогичным характеристикам в образцах меди после РКУП. Стоит отметить, что как показано в [8], коэффициент диффузии примеси вдоль сформированных при РКУП границ зерен во много раз превышает коэффициент объемной диффузии, поэтому возникает возможность использовать шариковую обкатку для легирования приповерхностных областей материала.

Что касается увеличения коэффициента оптического отражения меди после шариковой обкатки, то это может свидетельствовать об уменьшении рассеяния электронов проводимости в приповерхностном слое. Одной из причин этого может быть то, что объем зерен после такой обработки практически не содержит дислокаций, которые сконцентрированы в области межзеренных границ, причем, возможно, что там их расположение имеет упорядоченный характер.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16058–00132 Бел\_а.

#### **Список литературы:**

1. 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.
2. Ахмадеев Н.А., Валиев Р.З., Кобелев Н.П., Мулюков Р.Р., Сойфер Я.М. // *ФТТ*. 1992. Т.34. №10. С.3155–3160.
3. Kobelev N., Kolyvanov E., Estrin Y. // *Acta Mat*. 2008. V.56. P. 1473–1481.
4. Abrosimova G., Afonikova N., Estrin Y., Kobelev N., Kolyvanov E. // *Acta Mat*. 2010. V.58. P.6656–6664.
5. Кобелев Н.П., Колыванов Е.Л., Хоник В.А. // *ФТТ*. 2003. Т.45. №12. С.2124–2130.
6. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах// М.: Атомиздат, 1975. 472 с.
7. Колыванов Е.Л., Кобелев Н.П., Эстрин Ю.З. // *Деформация и Разрушение Материалов*. 2010. №4. С.1–6.
8. Amoual Y., Divinski S.V., Estrin Y., Rabkin E. // *Acta Mat*. 2007.V.55. P.5968–5979.