

Таким чином, в процесі дослідження особливостей гідридного перетворення за методикою оптичної відео-мікроскопії *in situ* в температурному інтервалі 270–100°C було дійсно встановлено, що при температурах вище 210°C  $\beta \rightarrow \alpha$  гідридне перетворення в сплаві PdH<sub>x</sub> розвивається без появи поверхневого рельєфу на поверхні шліфа, а у температурному інтервалі 210–100°C на поверхні шліфа добре розпізнається поява поверхневого рельєфу в результаті зародження та зросту зародків.

Також зареєстровано різноманітність морфологічних типів продуктів гідридного перетворення в інтервалі температур 210–100°C (від пластинчасто-рейкової форми, до масивної, близької до рівноосної). Саме різністю питомих об'ємів фаз та водневими напруженнями, що збільшуються при зниженні температури, пояснюються відсутність поверхневого рельєфу перетворення при температурах вище 230°C і гальмування перетворення в приповерхневих шарах зразка зі зниженням температури від 190°C до 100°C у сотні разів.

### Список літератури

1. Водородная обработка материалов: Сб. информ. матер. Первой межд. конф. «ВОМ-95», Донецк, 20–22 сентября 1995 г. — Донецк, 1995. — Ч.1. — 124 с.; Ч.2. — 83 с.
2. Водородная обработка материалов: Сб. информ. матер. Второй межд. конф. «ВОМ-98», Донецк, 2–4 июня 1998 г. — Донецк, 1998. — 235 с.
3. *Proceedings* of the selected papers of the 1st Int. Conf. on Hydrogen Treatment of Materials, Donetsk, 1995 // *International Journal of Hydrogen Energy*, 1997. — Vol. 22. — No 2/3.
4. *Proceedings* of the selected papers of the Second International Conference on Hydrogen Treatment of Materials, НТМ-98. 2-4 June 1998, Donetsk, Ukraine//*International Journal of Hydrogen Energy*, 1999. — Vol. 24. — No.9.
5. Гольцов В.А., Артеменко Ю.А. Исследование кинетики изотермических гидридных превращений в термодинамически открытой системе палладий-водород // *Физика металлов и металловедение*, 1991. — № 10. — С. 160–167.
6. Гольцов В.А., Артеменко Ю.А. Кинетические и морфологические особенности гидридных превращений в системе палладий-водород // *Физика металлов и металловедение*, 1991. — № 2. — С. 181–188.
7. Гольцов В.А., Артеменко Ю.А. Диаграммы изотермических гидридных превращений в термодинамически открытой системе палладий-водород // *Физика металлов и металловедение*, 1993. — Т. 76. — С. 110–113.
8. Гольцов В.А., Артеменко Ю.А. Влияние давления газообразного водорода на морфологические и кинетические особенности гидридных превращений в термодинамически открытой системе палладий-водород // *Физика металлов и металловедение*, 1994. — Т. 78. — С. 114–121.
9. Гольцова М.В., Артеменко Ю.А., Зайцев В.И. Особенности кинетики дегазации и гидридного бета-альфа превращения в термодинамически открытой системе палладий-водород // *Физика металлов и металловедение*, 1997. — Т. 84. — С. 140–143.
10. Гольцова М.В., Артеменко Ю.А., Зайцев В.И. Влияние перегрева выше критической точки на развитие изотермического  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения в системе Pd-H // *Физика металлов и металловедение*, 1999. — Т. 87. — С. 65–69.
11. Artemenko Yu.A., Goltsova M.V., Zaitsev V.I. Kinetics of the reverse  $\beta \rightarrow \alpha$  hydride transformation in Pd-H system// *Металлофизика и новейшие технологии*, 1999. — Т. 21. — С. 36–39.

© Гольцова М.В., 2002

ДОРОХОВ В.В., КИСЕЛЕВА И.В., РЫЖИКОВ А.А., МАРЧУК С.И. (ДонНТУ)

### АНИЗОТРОПИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕДИ

Представлены результаты экспериментальных исследований анизотропии склерометрической микротвердости на гранях (011) и (111) монокристаллов меди при разных условиях нагружения.

Ориентационная зависимость микротвердости монокристаллов меди изучалась во многих работах [1–3]. Эти исследования, проведенные при разных способах нагружения и в широком диапазоне нагрузок на индентор, показали, что на грани (001) микротвердость максимальна в направлении  $\langle 110 \rangle$  и минимальна - вдоль  $\langle 100 \rangle$ . Однако на других гранях анизотропия практически не изучена. Это касается не только монокристаллов меди, но и других металлических кристаллов.

Целью настоящей работы являлось исследование ориентационной зависимости микротвердости на двух главных гранях монокристаллов меди — (011) и (111).

Монокристаллы меди чистотой 99,99% выращивались методом Бриджмена-Стокбаргера и имели размер в поперечнике 6...7,5 мм. Методом электролитической полировки с точностью  $1...2^\circ$  выводились плоскости (011) и (111), что контролировалось по лауэграммам. Кристаллографические направления на выведенных плоскостях определялись по электронограммам.

В связи с тем, что геометрия индентора и нагрузка существенно влияют на склерометрическую твердость, в опытах варьировались оба эти параметра. В качестве наколечника использовалась трехгранная алмазная пирамида Берковича, которая по сравнению с другими инденторами обеспечивает наибольшую и наименьшую степень деформации соответственно при царапании гранью и ребром вперед. Нагрузки на индентор варьировались в пределах 0,196...0,98 Н. Склерометрическую микротвердость вычисляли как отношение нормальной нагрузки на пирамиду к площади поверхности ее контакта с образцом при царапании ребром ( $H_{\nabla p}$ ) и гранью пирамиды ( $H_{\nabla r}$ ):

$$H_{\nabla r} = \frac{6276 \cdot P}{b^2}; H_{\nabla p} = \frac{3138 \cdot P}{b^2},$$

где  $P$  — нормальная нагрузка, Н;  $b$  — ширина канавки, мкм.

Микротвердость царапанием определяли с помощью прибора ПМТ-3. Для нанесения канавок в разных кристаллографических направлениях использовалось поворотное приспособление, установленное на предметном столике микротвердомера. Скорость царапания составляла 0,04...0,05 мм/с. Расстояние между осями смежных царапин выдерживалось не менее тройной ширины царапины. Длина царапины равнялась около 0,5 мм.

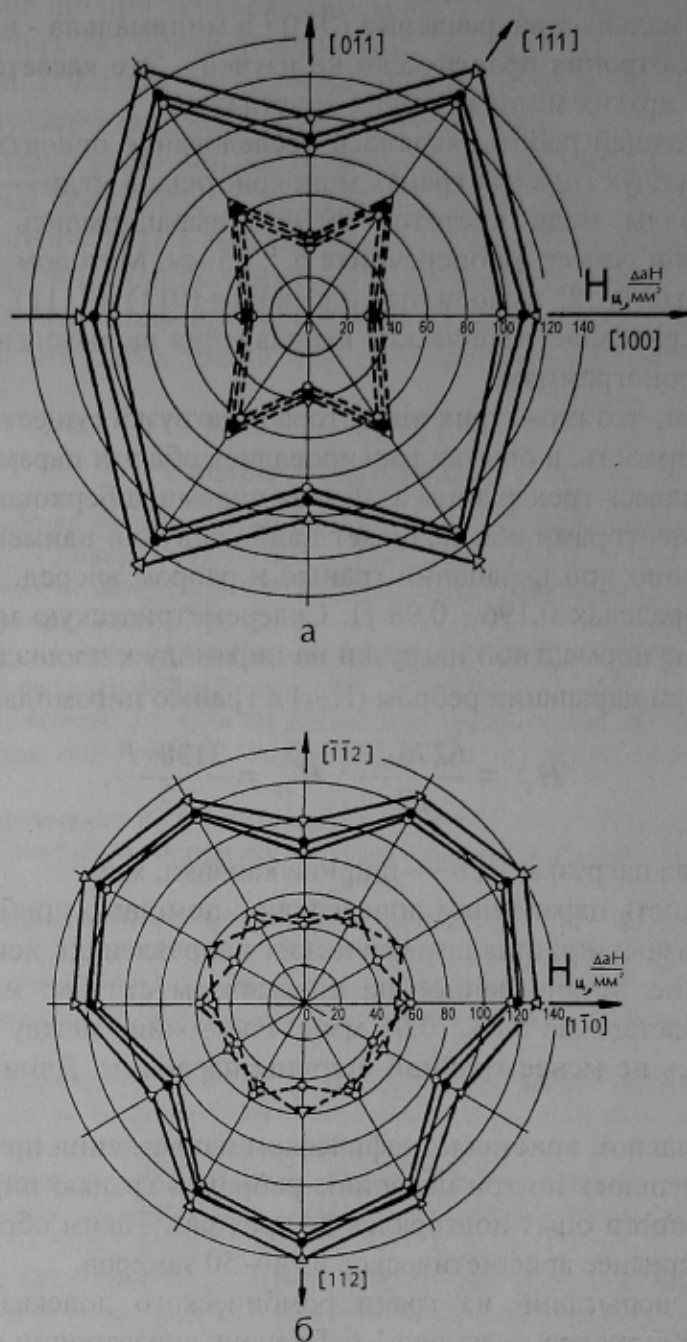
В каждом главном кристаллографическом направлении при одинаковой нагрузке на индентор проводилось по три царапины ребром и гранью пирамиды. После споллирования поверхности опыт повторялся до трех раз. Таким образом, ширина канавок определялась как среднее арифметическое из 40–50 замеров.

Результаты испытаний на грани ромбического додекаэдра представлены на рис.1,а, а на грани октаэдра — на рис.1,б. Степень анизотропии оценивали с помощью коэффициента анизотропии I-го рода, определенного как отношение значений максимальной и минимальной твердости в пределах одной плоскости. Кроме того, для оценки обнаруженной на грани (111) полярности свойств вдоль  $\langle 112 \rangle$  использовали коэффициент полярной анизотропии.

Рассмотрим результаты исследования анизотропии отдельно по каждой грани монокристалла.

На грани (011) микротвердость измерялась вдоль трех главных кристаллографических направлений  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ . Как видно, независимо от условий испытания, максимальная микротвердость имеет место в направлении  $\langle 111 \rangle$ . При этом анизотропия сильнее выражена при царапании ребром (73...97%), чем при царапании гранью (44...51%). Ориентация пирамиды относительно направления царапания влияет также и на характер ориентационной зависимости. Так, при царапании ребром минимальное значение микротвердости соответствует направлению  $\langle 100 \rangle$ , а при царапании гранью

вперед — направлению  $\langle 011 \rangle$ . Величина микротвердости, измеряемая при царапании гранью пирамиды, в 2–5 раз больше, чем при царапании ребром.



**Рисунок.** Анизотропия микротвердости на плоскости (011) — (а) и (111) — (б) монокристалла меди при царапании гранью (сплошная линия) и ребром (пунктирная линия) и при разной нагрузке на индентор:  $\Delta$  — 0,196 Н;  $\bullet$  — 0,490 Н;  $\circ$  — 0,980 Н

На грани октаэдра (111) в направлении  $\langle 112 \rangle$  выявлена полярность твердости, причем особенно сильно — при царапании гранью (42...52%). Полярными являются направления  $\langle 112 \rangle$  и  $\langle 11\bar{2} \rangle$ , последнему направлению соответствует меньшая микротвердость. Царапанье ребром при малых нагрузках на индентор приводило к изменению характера анизотропии. Так, максимальное сопротивление царапанию наблюдается в направлении  $\langle 110 \rangle$  в отличие от всех остальных случаев, когда максимум твердости соответствует направлению  $\langle 112 \rangle$ . Величина микротвердости на плоскости (111)

при царапании гранью пирамиды также значительно выше (в 2–3 раза), чем при царапании ребром, однако степень анизотропии выше при царапании гранью пирамиды, чем при царапании ребром.

Следует отметить, что на обеих исследованных гранях, независимо от условий нагружения и направления испытания, образование царапин проходило путем пластического деформирования — во всех случаях канавки имели ровные края без признаков микрорезания.

Таким образом, проведенные исследования выявили значительную анизотропию пластического деформирования царапанием на гранях (011) и (111) монокристаллов меди. Степень и характер анизотропии зависят от ориентации пирамиды относительно направления царапания и от нагрузки на индентор. Как и при измерении твердости вдавливанием, величина микротвердости при царапании уменьшается при увеличении нагрузки на индентор. Грань с меньшей симметрией (011) проявляет более высокую степень анизотропии, чем грань с большей симметрией (111). Это объясняется меньшей плотностью упаковки. На грани октаэдра наблюдается полярность микротвердости вдоль направления  $\langle 112 \rangle$ .

### Список литературы

1. **Meincke H.** Herstellung einer Werkstoffzone mit Abnutzungswiderstand // Zeitschrift für Metallkunde, 1950. — В. 41. — Н. 10. — С. 344–346.
2. **Dyer L.D.** Rolling friction on single crystals of copper in the plastic range // Acta metallurgica, 1961. — Vol. 9. — № 10. — P. 928–936.
3. **Steijn R.P.** Friction and wear of single crystals // Wear, 1964. — 7. № 1. — P. 48–66.
4. **Lizuka Takashi** и др. Изучение механических повреждений при царапании на поверхности (111) Si // Jap. J. Appl. Phys. Pt1, 1994. 33. — № 3A. — P. 1427–1434.
5. **Sheu T.S., Chang S.C.** // J. Mater. Sci. Lett, 1992. — 11. — № 10. — P. 706–707

© Дорохов В.В., Киселева И.В., Рыжиков А.А., Марчук С.И., 2002

БЫКОВСКИХ С.В., ГОРБАТЕНКО В.П. (ДонНТУ), ШЕВЧЕНКО А.И. (ОАО «СЕЛЬМАШ»), ПОЗНЯК Д.В. (ДонНТУ)

### ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ ПРИ ЗАКАЛКЕ ИЗ МЕЖКРИТИЧЕСКОГО ИНТЕРВАЛА ТЕМПЕРАТУР

*На основе результатов дилатометрических измерений, количественного металлографического анализа и механических испытаний выполнен анализ влияния микродобавок титана и бора на положение критических точек, структуру и свойства конструкционных среднеуглеродистых сталей после закалки из межкритического интервала температур.*

Одним из наиболее рациональных путей повышения качества конструкционных сталей является их экономное легирование комплексом микродобавок, позволяющих получить гарантированно высокие значения механических характеристик, что в целом обеспечивает высокую надежность и долговечность изделий. Положительно зарекомендовало себя применение микролегированной титаном и бором среднеуглеродистой конструкционной стали для производства износостойких деталей сельскохозяйственного машиностроения [1].