

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ДОВОДКИ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ НА ПАРАМЕТРЫ ТОНКОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ**

*In the article the results of x-ray photography researches are roined as evaluated by distortions of crystalline grate of beryllium bronze after polishing diamond pastes*

**Введение**

Непрерывное развитие промышленности: приборостроительной, автомобильной, сельскохозяйственной, станкостроительной и других отраслей, связано с использованием ответственных сопрягающихся узлов и деталей машин. Качество функционирования таких машин непосредственно определяется показателями качества контактирующих поверхностей и эксплуатационными характеристиками сопрягающихся деталей [1]. Так, например, в настоящее время актуальной и не полностью решенной является задача обработки маятников акселерометров, применяемых в приборостроении (рисунок 1).

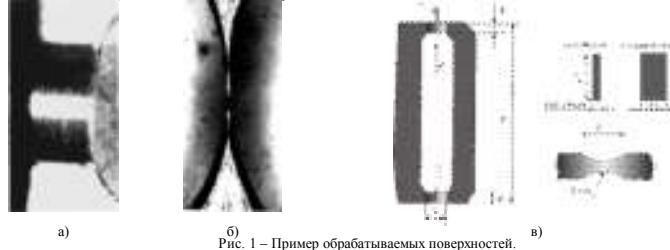


Рис. 1 – Пример обрабатываемых поверхностей.

Данное изделие работает при циклических знакопеременных нагрузках. Исследованиями ученых доказано что наибольшую долговечность имеет изделие с минимальными искажениями кристаллической решетки (обеспечивается методами электро-химической обработки и электро-химического полирования) [2]. Для обработки таких изделий применяются методы фрезерования и шлифования, после которых в поверхностном слое изделия формируется наклеп в пределах 0,03–0,2 мм, что отрицательно сказывается на работоспособности изделий. [3]. Другим методом обработки прецизионных поверхностей является доводка свободным абразивом, после предварительного шлифования и термической обработки [4].

**Цель работы:** доказать что методами доводки возможно получение деталей с минимальными искажениями кристаллической решетки, лежащими в поверхностном слое не превышающем 2 мкм.

В данной работе был проведен эксперимент по доводке маятников акселерометров, изготовленных из бериллиевой бронзы БрБ2. Доводку образцов производили методом «жестких осей» на специально разработанной установке (рисунок 2, а, б) алмазными пастами из микропорошков зернистостью: 60/40-1/0.



Рис. 2 – Схема экспериментальной установки  
а) – общий вид установки; б) – приспособление для установки и закрепления маятника.

Исследование влияния режимов процесса доводки на параметры тонкой кристаллической структуры (ТКС) выполняли на дифрактометре «Дрон-2» в  $\theta\theta\theta$  излучении рентгеноструктурным методом (рисунок 3). [6, 8].



Текстуру изучали методом наклона (методом Шульца). Съемку производили в железном неотфильтрованном излучении при напряжении 25 кВ и токе трубки 5 мА.

Информация, получаемая при исследовании, определялась путем регистрации рентгеновского излучения с последующим анализом профиля рентгеновской линии. Рентгенографирование образцов

производили при скорости движения счетчика автоматической регистрации интенсивности излучения  $1/8$  град/мин, скорости движения диаграммной ленты 600 мм/час. При сильном размытии дифракционной линии второго порядка, отражения регистрации линий производили по точкам. Для исследования ТКС рентгенографировали линии 111, 220, 311.

Характеристики ТКС (размеры блоков, микроискажения) изучали рентгенографическим методом аппроксимации [6, 9].

Для выделения физического уширения при исследовании ТКС исключали из общего уширения долю уширения, связанную с условиями съемки. Это осуществлялось с помощью стандартного образца (эталона), для которого ширина линий определялась только геометрией съемки. Регистрацию линий эталона производили в тех же геометрических условиях, что и для исследуемых образцов. Такой эталон был изготовлен из материала с крупными блоками (размеры блоков превышали 1500 Å), в котором отсутствовали микроискажения. Эталон был получен при отжиге исследуемых материалов до температуры начала рекристаллизации с последующим охлаждением. При этом линии  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  эталона полностью разделялись на линии с большими углами. Качество эталона проверяли съемкой в расходящемся пучке рентгеновских лучей. На рентгенограммах были видны мелкие, равномерно распределенные линии без фона между ними. Далее рентгенографировали линии  $h_1, k_1, l_1$  исследуемых образцов, изготовленных доводкой свободным абразивом из холоднотянутой ленты на следующих режимах:

- окружная скорость притира  $V_{\text{пр}} = 0,33$  м/с;
  - величина усилия прижима на притир  $F_{\text{пр}} = 0,2 \pm 0,8$  кг/см<sup>2</sup>;
  - движение подачи притира в продольном направлении  $S_{\text{пр}} = 1,6 \cdot 10^{-3}$  м/с.
- В настоящей работе разделение дублета рентгеновских линий на  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  проводили методом Решингера [5]. Ширину исследуемых линий образцов и эталона определяли по формулам:

$$B = \int_{h_1}^{h_2} \frac{h(2V_k) d(2V_k)}{h(0)}$$

$$b = \int_{h_1}^{h_2} \frac{g(2V_k) d(2V_k)}{g(0)}$$

где  $B$  – истинная ширина линий образца, зависящая от состояния структуры и условий съемки с учетом поправки на  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  дублет;  $b$  – геометрическое уширение (линии эталона);  $h(2V)$  и  $g(2V)$  – интенсивность линий исследуемых образцов и эталона;  $h(0)$  и  $g(0)$  – максимальная интенсивность линии эталона и образца;  $V_k$  – брегговские углы отражения от плоскости,  $2V_1, 2V_2, h_k, k_k, l_k$  – углы, при которых рентгеновская линия сливается с фоном.

С учетом поправки на инструментальное уширение определили физическое уширение:

$$\beta = \int_{h_1}^{h_2} \frac{f(2V) d(2V)}{f(0)}$$

где  $f(2V)$  – распределение интенсивности рентгеновских линий с учетом инструментального уширения.

Общее уширение вычисляли как среднее геометрическое физических уширений при аппроксимации функциями Коши и Гаусса:

$$\beta = \sqrt{\frac{B^2 - b^2}{4} + \frac{b^2}{4}}$$

По данным тонкой кристаллической структуры рассчитывали микроискажения кристаллической решетки, размер блоков и плотность дислокаций. По изменению плотности дислокаций определяли толщину наклепанного слоя исследуемых образцов.

С целью устранения погрешности исходной структуры образцов, полученных вырезкой из холоднотянутой ленты, перед доводкой их поверхности рентгенографировали, затем путем селективного отбора формировали партии с одинаковой исходной структурой.

Точность решения задач, проводимых с помощью данного метода, в первую очередь зависит от качества проведенного эксперимента.

Основные требования, предъявляемые к качеству дифракционной линии, сводились к тому, чтобы интенсивность линии была выше флукуаций фона и ошибка при определении интенсивности не превышала 5%. Необходимо отметить, что определение параметров ТКС по одной линии дает некорректные результаты. Для корректного определения параметров ТКС проводили съемку минимумом двух линий, отличающихся порядком отражений. При экспериментальном затруднении съемки линий второго порядка отражения проводили анализ иных линий с соответствующей корректировкой методов расчета параметров ТКС [5].

При исследовании ТКС БрБ2 рентгенографировали линии 111-220 или 111-311.

Оценка точности дифрактометрических исследований является основой для получения надежных данных ТКС исследуемых материалов.

Для анализа погрешности измерения параметров тонкой структуры была проведена и рассмотрена оценка статистических ошибок счета при измерении интенсивности рентгеновского излучения дифрагированных лучей.

Известно, что интенсивность излучения, которая регистрируется счетчиком, определяется скоростью счета импульсов.

$$n = \frac{N}{T}$$

где  $N$  – число импульсов, зарегистрированных счетчиком за определенное время  $T$ .

Вероятность попадания кванта рентгеновского излучения распределена во времени равномерно (при неподвижном счетчике и высокой стабильности работы всех электрических схем) определяется распределением Пуассона.

Абсолютная  $\sigma_M$  и относительная  $\delta_M$  погрешности, обуславливаемые статической природой потока квантов, определяются соответственно следующими выражениями:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_N &= \sqrt{N} \\ \sigma_{N_s} &= \frac{\sigma_N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \end{aligned} \right.$$

Расчеты величин этих погрешностей методом измерения времени накопления постоянного числа импульсов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения погрешностей при постоянном числе импульсов

$N_0$ , имп	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$\sigma_{N_s}$ , имп/с	$10^2$	$3,2 \times 10^2$	$10^3$
$\sigma_{N_s}$ , %	2	0,32	0,10

При измерении интенсивности дифрагированного излучения  $N_s$  в присутствии фона  $N_0$  и времени  $T$  измерения интенсивности линии  $N$  и фона получим:

$$\left\{ \begin{aligned} N_s &= \sqrt{N_s + N_0} \\ N_s &= N - N_0 \\ \sigma_{N_s} &= \sqrt{1 + K_{\phi}^2} / \sqrt{N_s} \\ K_{\phi} &= N_0 / N_s \end{aligned} \right.$$

Величина относительной погрешности измерения интенсивности линий при различных значениях  $K_{\phi}$  приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Относительная погрешность измерения интенсивности рентгеновских линий с учетом фона

$N_s$ , с <sup>-1</sup>	1000	1000	1000	600
$T$ , с	100	100	100	1000
$N_0$ , с <sup>-1</sup>	50	500	200	200
$N_s$ , с <sup>-1</sup>	950	500	200	200
$K_{\phi}$	0,05	1	2	2
$\sigma$ , %	0,34	0,77	1,6	0,5

Видно, что точность измерения возрастает при увеличении времени измерения, уменьшении интенсивности фона и увеличении интенсивности рентгеновского рефлекса.

При проведении исследований время подбиралось таким образом, чтобы относительная погрешность измерений не превышала 0,5-0,1%. Если интенсивность определяется интенсивметром с записью дифракционной линии на самописце, то максимальная относительная погрешность измерения скорости счета может быть найдена по формуле:

$$\sigma_{\text{сч}} = \frac{1}{N} \cdot N \cdot \sigma_{\text{сч}}^2$$

Для  $N_1 = 1000^4$  с и  $N_2 = 1000^1$  с при  $RC = 2$  с максимальная погрешность равна соответственно 5% и 1,6%, а при  $N = 2000^1$  с,  $RC = 2$  с – 1,1%.

Расчитаем потери счета из-за конечной величины мертвого времени счетчиков. Известно, что мертвое время гейгеровского счетчика равно примерно 200 мкс (150-200), для приборов типа

CPC-1мкс. Если  $N_{\text{сч}}$  – измеренная счетчиком скорость счета импульсов, то не будет считано  $N_{\text{сч}} \cdot \tau_{\text{м}} \cdot \sigma_{\text{сч}}$  импульсов и, таким образом, реальная скорость счета импульсов равна:

$$\left\{ \begin{aligned} N &= N_{\text{сч}} + N_{\text{сч}} \cdot \tau_{\text{м}} \cdot \sigma_{\text{сч}} \\ N &= N_{\text{сч}} / (1 - \tau_{\text{м}} \cdot \sigma_{\text{сч}}) \end{aligned} \right.$$

Тогда относительная погрешность при измерении может быть вычислена по формуле:

$$\sigma_{\text{сч}} = \frac{N - N_{\text{сч}}}{N_{\text{сч}}} = \tau_{\text{м}} \cdot \sigma_{\text{сч}}$$

При измерении скорости счета 100 и 1000 имп/с для счетчиков МСТР-4 и CPC вычисленные значения поправки  $N$ , относительной погрешности измерений без поправок  $\sigma_{\text{сч}}$  и относительной погрешности величины  $\sigma$  представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Погрешности скорости счета с учетом мертвого времени счетчика

Тип счетчика	МСТР-4		CPC	
Мертвое время, с	$2 \times 10^{-4}$		$10^{-6}$	
$N_{\text{сч}}$ , с <sup>-1</sup>	100	1000	100	1000
$N$ , с <sup>-1</sup>	102	1250	100	1001
$\sigma_{\text{сч}}$ , %	2	20	0,01	0,1
$\sigma$ , %	0,02	3,1	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$

Для счетчиков дифрактометра Дрон-2 ошибка в потерю счета при интенсивности, меньшей  $10^4$  имп/с, не превышает 1%. Величина направленного дифракционного максимума  $N$  с учетом фона  $N_0$  и измеряемого максимума  $N_s$  может быть найдена по формуле:

$$N = N_s / (1 - \tau_{\text{м}}) - N_0 / (1 - \tau_{\text{м}})$$

Для дифрактометра Дрон-2 скорость счета без учета мертвого времени равна 900 имп/с, а с учетом – 901 имп/с, при относительной погрешности измерения интенсивности без учета мертвого времени – 0,11%. Поэтому при измерении интенсивности линий на дифрактометре Дрон-2 учет мертвого времени не производится.

Для повышения точности измерений параметров ТКС при измерении интенсивности размытых дифракционных линий в проведенных исследованиях вводилась поправка на угловой множитель  $PLG$  (угловой множитель равен произведению кинематического, поляризационного и геометрического множителей). Профиль рентгеновской линии пересчитывали в истинный делением ординат (высот над фоном) на соответствующий множитель.

$$PLG = \frac{1 + \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta \cdot \sin 2\theta}$$

Исправленные значения интенсивности позволили более точно определить интегральную интенсивность уширения и параметры ТКС. Анализ работ [5, 6, 11] показывает, что суммарная ошибка измерения интенсивности, обусловленная нестабильностью источника излучения и детектора, дрейфом этих устройств, потерями счета, составляет величину, меньшую 2%.

Следует учесть, что уширение дифракционной линии связано также с несовершенством геометрии съемки.

Причиной этого искажения являются:

- характерный профиль рентгеновского излучения;
- дефокусировка луча вследствие вертикальной и горизонтальной расхожимости пучка;
- проникновение излучения в глубь образца.

Конечная ширина счетчика приводит к симметричному размытию дифракционного излучения.

Уменьшение инструментального уширения производили точной юстировкой гониометра и выбором оптимальных отношений геометрии съемки. Учет инструментального уширения вводили съемкой соответствующего эталона.

В ходе работ было проведено определение случайной погрешности ТКС. Расчеты показали, что величина случайной погрешности при определении микроискажений не превышает 10%. Этот результат согласуется с данными работ [7, 10, 12], в которых показано на основе многократной съемки одного и того же образца, что величина относительной погрешности составляет соответственно 5 и 15%.

Таким образом, можно утверждать, что в проведенных исследованиях суммарная погрешность измерения не превышала 10% – 15%.

В результате эксперимента наблюдался процесс незначительного упрочнения перемычки маятника на небольшую глубину, что было подтверждено рентгеноструктурным анализом. Результаты рентгеновских исследований (таблица 4) показывают, что в процессе доводки свободным абразивом при определенном сочетании технологических режимов могут быть получены поверхности с ненаклапаным поверхностным слоем.

Таблица 4 – Результаты рентгеновских исследований

Образец №	Режим обработки	Уширение линии, мм		Физическое уширение, град		Микроискажения $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-1}$	Плотность дислокаций $\rho$ , см <sup>-2</sup>	Размер блоков $D_1$
		111 $\alpha$	311 $\alpha$	111 $\alpha$	311 $\alpha$			
1	Эталон	22	82					
2	Прокат (исх. пов.)	35	108	0,45	1,17	1,87	$10^{10}$	319,3
3	0,2	26	96	0,23	0,83	1,74	$2,0 \cdot 10^{11}$	1867
4	0,4	27	97	0,26	0,86	1,75	$3,7 \cdot 10^{11}$	1356
5	0,6	29	99	0,35	0,93	1,77	$5,2 \cdot 10^{11}$	814
6	0,8	34	102	0,43	1,1	1,80	$9,2 \cdot 10^{11}$	336

Сравнивая ширину (рисунок 4) рентгеновских образцов, обработанных алмазными пастами с линиями образца, полученного электрохимическим полированием, можно констатировать, что процесс доводки свободным абразивом (при данных условиях обработки) не вносит существенных дополнительных напряжений в исходную структуру обрабатываемых поверхностей.

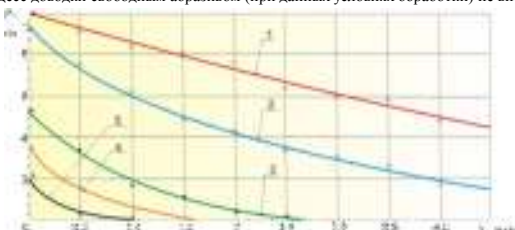


Рис. 4 – Плотность дислокаций в поверхностном слое детали из бериллиевой бронзы БрБ2 после доводки алмазными пастами с зернистостью 60/40-1/0.

1 – Прокат в состоянии поставки; 2 –  $\rho_D^P = \rho_D^0 \cdot \sqrt{P}$  кг/см<sup>2</sup>; 3 –  $\rho_D^P = \rho_D^0 \cdot \sqrt[3]{P}$  кг/см<sup>2</sup>;  
4 –  $\rho_D^P = \rho_D^0 \cdot \sqrt[4]{P}$  кг/см<sup>2</sup>; 5 –  $\rho_D^P = \rho_D^0 \cdot \sqrt[5]{P}$  кг/см<sup>2</sup>.

**Выводы:**

Исследование тонкой кристаллической структуры образцов из бериллиевой бронзы БрБ2 после доводки свободным абразивом позволяет сделать вывод о существенном влиянии усилия прижима  $P_f$ , действующего в радиальном направлении, на характер пластической деформации. Установлено что при обработке с усилиями  $P_f$  лежащими в диапазоне 0,2÷0,5 кг/см<sup>2</sup> обеспечивает глубину дефектного слоя (с микроскажениями кристаллической решетки) порядка 2 мкм. С увеличением усилия прижима  $P_f$  увеличивается ширина дифракционных линий, плотность дислокации и микроскажения кристаллической решетки. Таким образом, управляя технологическими режимами, можно влиять на степень и глубину наклепа при доводке маятников.

Помимо исследования параметров искажения кристаллической решетки следует провести испытания обработанных изделий на долговечность, что представляет собой перспективы дальнейших разработок в данном направлении.

**Список литературы:** 1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977.—390 с.; 2. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания/ В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977, 304 с.; 3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке/ Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979.—232 с.; 4. Братин С.М. Технологічні основи забезпечення якості і підвищення стабільності високопродуктивного чистового тонкого шліфування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування»/ С.М. Братин. – Одеса, 2006.—35 с.; 5. Баракин В.В., Олейникова Т.М. Исследование тонкой кристаллической структуры, работы выхода электронов и коррозионной стойкости электролитического железа // Защита металлов, 1979, № 6, с 708–710.; 6. Баракин В.В., Корольбе В.И. Тонкая кристаллическая структура и некоторые свойства электролитических железо-кобальт-никелевых сплавов после отжига. // Тез. док. Всесоюзной конференции: Средства автоматизации и контроль источников тока. – М., 1975, с. 63–64.; 7. Гинье А. Рентгенография кристаллов: Теория и практика // Пер. с франц. – М.: Физматгиз, 1961, 604 с.; 8. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: Металлургия, 1970, 218 с.; 9. Кривоглаз М.А., Рубиошанка К.П. Рассеяние рентгеновских лучей кристаллами, состоящими из блоков и содержащими дислокации // Вопросы физики металлов и металловедение: – К.: Труды института металлофизики АН УССР, 1963, с.25–31.; 10. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. / Уманский Я.С., Скотков Ю.А., Иванов А.Н. и др. – М.: Металлургия, 1982, 632 с.; 11. Лаборатория металлографии / Панченко Е.В., Скотков Ю.А., Кример Б.И. и др. – М.: металлургия, 1965, 245 с.; 12. Лысак Л.И. Определение упругих искажений и размеров дисперсионных блоков. // Физические основы прочности и пластичности металлов. – М.: Гос. научн.-техн. из-во по черной и цветной металлургии, 1963, с. 153–171.