

ЭВОЛЮЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПОДШИПНИКА

В. Л. Зозуля¹, Д. И. Исаков¹, З. И. Колупаева², **А. Т. Пугачев²**, С. В. Суrowицкий²

¹ХАДО, Украина, Харьков,

²НТУ «ХПИ», Украина, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 02.02.2015

Исследованы изменения напряженного состояния и структуры поверхности трения обоймы упорного роликового подшипника, изготовленного из стали с содержанием С 0,95–1,05, Мп 0,20–0,40, Si 0,17–0,37, Cr 1,3–1,65, а S, P, Ni, Cu не более 0,020, 0,027, 0,030, 0,25 % соответственно. Исследования проводились как в исходном состоянии заводской поставки, так и после испытаний на машине трения через каждые 10 часов вплоть до 100 часов. Изучение структуры и напряженного состояния проводилось методами рентгеновского структурного анализа. Изменение уровня остаточных макронапряжений обусловлено пластической деформацией в поверхностном слое однако изменения дисперсности и уровня микродеформаций не обнаружено. Это означает, что реализуется ситуация, при которой зарождение, движение и исчезновение дислокаций происходит при неизменной плотности хаотически расположенных дислокаций.

Ключевые слова: подшипник, трение, остаточные макронапряжения, структура, микродеформация, рентгеновский структурный анализ.

ЕВОЛЮЦІЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ ПІДШИПНИКА

В. Л. Зозуля, Д. І. Ісаков, З. І. Колупаєва, **А. Т. Пугачов**, С. В. Суrowицький

Досліджені змінення напруженого стану та структури поверхні тертя обойми упорного роликового підшипника, виготовленого із сталі, яка вміщує С 0,95–1,05, Мп 0,20–0,40, Si 0,17–0,37, Cr 1,3–1,65, а S, P, Ni, Cu не більше 0,020, 0,027, 0,030, 0,25 % відповідно. Дослідження проводилися як у вихідному стані заводської поставки, так і після випробувань на машині тертя через кожні 10 годин до 100 годин. Вивчення структури та напруженого стану проводилися методами рентгенівського структурного аналізу. Змінення рівня залишкових макронапружень обумовлено пластичною деформацією у поверхневому шарі, але змінення дисперсності і рівня мікродеформацій не виявлено. Це означає, що реалізується ситуація, при якій зародження, рух та зникнення дислокацій відбувається при незмінній щільності хаотично розташованих дислокацій.

Ключевые слова: підшипник, тертя, залишкові макронапруження, структура, мікродеформація, рентгенівський структурний аналіз.

EVOLUTION OF BEARING FRICTION SURFACE STRESS STATE AND STRUCTURE

V. L. Zozulia, D. I. Isakov, Z. I. Kolupaieva, **A. T. Pugachov**, S. V. Surovitskiy

The changes in the stressed state and in structure and surface friction cage thrust roller bearing made of steel with a C content of 0.95–1.05, Mn 0.20–0.40, Si 0.17–0.37, Cr 1.3–1.65, a S, P, Ni, Cu not more than 0.020, 0.027, 0.030, 0.25 %, respectively. Studies conducted both in the initial state factory shipment, and after the friction test machine after every 10 hours up to 100 hours. Structure and stress state were investigated by X-ray structural analysis. Change of residual macrostress due to plastic deformation in surface layer, but change of dispersion and microdeformations not revealed. Therefore initiation means, movement and disappearance of dislocation occurs at the constant constant density of randomly arranged dislocations.

Keywords: bearing, friction, residual macrostresses, structure, microstresses, X-ray structural analysis.

Подшипниковая сталь с содержанием С 0,95–1,05, Мп 0,20–0,40, Si 0,17–0,37, Cr 1,3–1,65, а S, P, Ni, Cu не более 0,020, 0,027, 0,030, 0,25 % соответственно применяется для изготовления шариков, роликов и колец подшипников. В процессе работы эти

элементы испытывают многократное нагружение, которое распределяется в пределах очень небольшой опорной поверхности, называемой фактической площадью контакта [1]. В результате в каждом участке поверхности возникают контактные знакопеременные напряжения, вызывающие упругую и остаточную деформацию элементов подшипника. Целью данной работы было исследование изменения структуры и остаточных макронапряжений на дорожке трения обоймы упорного роликового подшипника (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид подшипника

Наружный диаметр обоймы 28 мм, внутренний — 15 мм, толщина 3 мм. Исследования проводились как в исходном состоянии заводской поставки, так и после испытаний на машине трения по схеме, представленной на рис. 2, через каждые 10 часов работы вплоть до 100 часов. Реализовывалась высшая кинематическая пара трения, обеспечивающая качение ролика с проскальзыванием: неподвижная плоская поверхность с контактом тела вращения по линии. Ролик из стали аналогичного состава высотой 3 и диаметром 3,5 мм. Во время испытаний задавались нагрузка и частота вращения, регистрировались время работы подшипника под нагрузкой и температура неподвижной обоймы. Во всех испытаниях осевая нагрузка (3000 Н) и частота вращения (1000 мин^{-1}) были постоянными, варьировалось время работы подшипника. Температура неподвижной обоймы подшипника, измеряемая контактной термопарой и по инфракрасному излучению во время эксперимента, не превышала 70° C . При работе подшипника на рабочей поверхности

образовывался след в виде дорожки трения, на которой и проводились исследования.

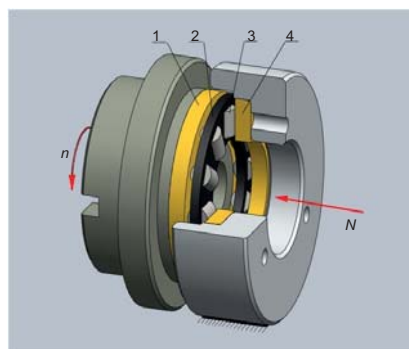


Рис. 2. Схема узла для испытаний: 1 — подвижная обойма подшипника, 2 — сепаратор, 3 — ролик, 4 — неподвижная обойма, n — вращение, N — нагрузка

Изучение структуры и напряженного состояния проводилось методами рентгеновского структурного анализа на рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-2 в излучении медного анода ($\lambda = 0,154051 \text{ нм}$) рентгеновской трубки 1.2 БСВ-22 при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе 20 мА. Для подавления флуоресцентного излучения элементов с атомным номером $Z < 29$ ($Z_{\text{Cu}} = 29$) применялся монохроматор дифрагированного пучка из пиролитического графита. Съёмки проводились в режиме ψ - 2ψ сканирования при поточечной регистрации интенсивности с шагом $0,15^\circ$. Глубина информативного слоя составляла $\sim 3 \text{ мкм}$.

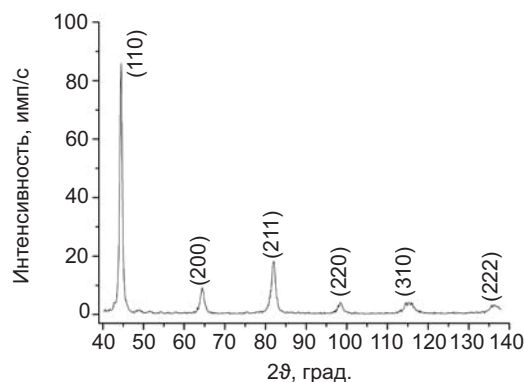
Оценка уровня макронапряжений проводилась методом наклонных съёмок ($\sin^2\psi$ -метод) [2]. Для реализации $\sin^2\psi$ -метода регистрировалась дифракционная линия (310) ОЦК решётки Fe, которая находится в прецизионной области углов и имеет достаточную интенсивность. Распределение интенсивности регистрировалось в интервале углов 2ψ 110 – 122° с шагом сканирования $0,15^\circ$ и временем экспозиции в каждой точке 40 с. Угол наклона ψ отражающих плоскостей относительно плоскости поверхности выбирался равным 0° , 30° и 45° .

Известно [3], что процессы фрикционного взаимодействия, как правило, вызывают пластическую деформацию поверхностных слоёв контактирующих тел. При этом изменяется плосконапряженное состояние поверхностных слоёв. А именно при аксиально симметричной обработке (трении, резании в тангенциальном направлении) величина внутренних остаточных

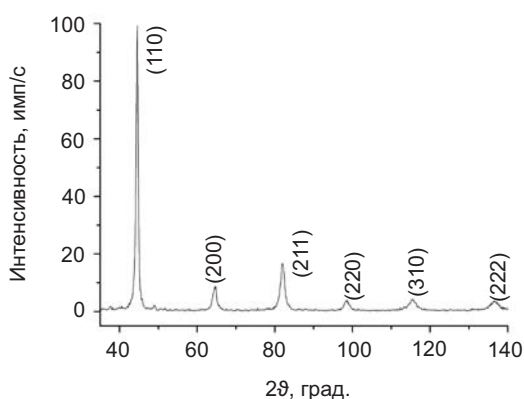
упругих напряжений в радиальном и тангенциальном направлении может быть различной. Поэтому на исходной поверхности кольца и дорожке трения после каждой обработки проводилась оценка уровня упругих макронапряжений, действующих в радиальном и тангенциальном направлении. Для этого проводились съемки одного и того же участка дорожки трения дважды: при радиальном направлении рентгеновского пучка и, повернув образец на 90° , тангенциальном направлении. По положению дифракционных линий (310) определяли межплоскостные расстояния и период решетки «а» α -Fe. Затем строились графики в координатах $a \cdot \sin^2\psi$, из которых определяли период решетки α -Fe в направлении нормали к поверхности a_\perp , в ненапряженном сечении a_0 и плоскости поверхности a_\parallel . Величину упругих макронапряжений оценивали по формуле $\sigma = \frac{E}{1+\mu} \frac{a_\parallel - a_\perp}{a_0}$. Значения модуля Юнга $E = 208,9$ ГПа и коэффициента Пуассона $\mu = 0,3$ были взяты из справочников [4, 5].

На рис. 3 для примера представлены диффрактограммы, полученные в исходном состоянии и после работы в течение 100 часов. На всех диффрактограммах выявляется только система дифракционных линий α -Fe, что свидетельствует об отсутствии заметных фазовых превращений на дорожке трения. Полученные $\sin^2\psi$ -графики при съемках в радиальном и тангенциальном направлениях в исходном состоянии оказались прямолинейными и имеющими одинаковый наклон, что указывает на симметричное плосконапряженное состояние (рис. 4). Уровень сжимающих остаточных макронапряжений $\sigma_R = \sigma_T = 2,1$ ГПа. С увеличением длительности работы подшипника симметричное плосконапряженное состояние переходит в несимметричное. На рис. 5 для примера приведены $\sin^2\psi$ -графики после работы в течение 100 часов. Уровень остаточных макронапряжений в радиальном направлении несколько увеличивается и становится близким к пределу прочности. Известно [6], что предел прочности указанной стали при закалке от 840°C в масле и при росте температуры отпуска в интервале от 200 до 450°C

изменяется от $2,16$ до $2,55$ ГПа. Уровень остаточных макронапряжений в тангенциальном направлении снижается (рис. 6).



а



б

Рис. 3. Диффрактограммы в исходном состоянии (а) и после 100 часов работы (б). Съемка в радиальном направлении

На формирование напряженного состояния могут оказывать воздействие три фактора: силовой, тепловой и фазовый. Так как никаких фазовых превращений в зоне трения не происходит, а уровень тепловых нагрузок достаточно мал ($\sim 70^\circ\text{C}$), очевидно, что основное влияние оказал силовой фактор. Известно [3], что неравенство величин остаточных напряжений в тангенциальном и радиальном направлениях является характерной особенностью макронапряженного состояния, появляющегося в результате превалирующего воздействия силового фактора. Уменьшение напряжений в тангенциальном направлении обусловлено анизотропным воздействием силового фактора и наблюдается не только при трении, но и при приточении и шлифовании [7]. При трении отношение тангенциальной составляющей силы к радиальной составляет $0,25\text{--}0,5$ [3].

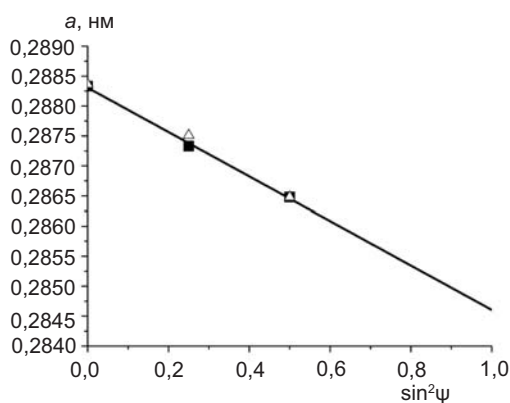


Рис. 4.: $\sin^2\psi$ -графики в исходном состоянии при съемке в радиальном (■) и тангенциальном (△) направлении

Важной характеристикой материала при эксплуатации являются параметры тонкой структуры — средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) и величина микродеформаций кристаллической решётки. Для их оценки использовался метод аппроксимации. Анализировалось физическое уширение линий (110) и (310). Отметим, что модули Юнга в направлении [110] и [310] близки. Для исключения инструментального уширения проводились съемки линий эталона.

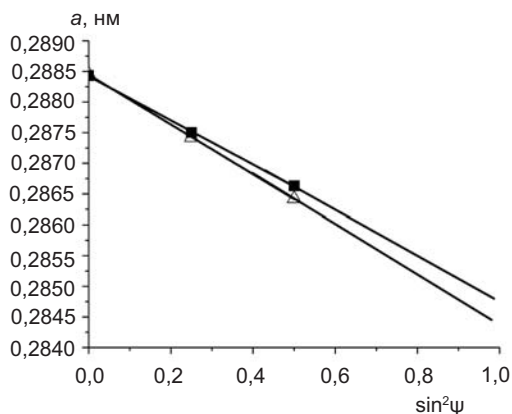


Рис.5. $\sin^2\psi$ -графики после работы в течение 100 часов при съемке в радиальном (■) и тангенциальном (△) направлении

Известно, что уширение дифракционных линий за счет малых размеров ОКР пропорционально $1/\cos\vartheta$, за счет микродеформаций кристаллической решётки пропорционально $\text{tg}\vartheta$ [8]. В том случае, когда отношение физического уширения линий находится между отношением тангенсов и отношением косинусов $\frac{\cos\vartheta_1}{\cos\vartheta_2} < \frac{\beta_2}{\beta_1} < \frac{\text{tg}\vartheta_1}{\text{tg}\vartheta_2}$ возможно

выделить часть, пропорциональную $\text{tg}\vartheta$ и оценить уровень микродеформаций, и часть, пропорциональную $1/\cos\vartheta$ и оценить средний размер ОКР. Если отношение $\frac{\beta_2}{\beta_1}$ совпадает с отношением $\frac{\cos\vartheta_1}{\cos\vartheta_2}$, уширение обусловлено дисперсностью структуры; если с отношением $\frac{\text{tg}\vartheta_2}{\text{tg}\vartheta_1}$, то уширение вызвано микродеформацией решётки.

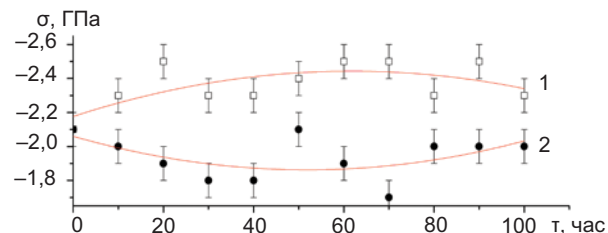


Рис. 6. Изменение остаточных макронапряжений в радиальном (1) и тангенциальном (2) направлениях

В табл. 1 приведены величины физического уширения линий (110) и (310) и их отношение. Отношение $\frac{\cos\vartheta_1}{\cos\vartheta_2}$ составляют 1,75; отношение $\frac{\text{tg}\vartheta_2}{\text{tg}\vartheta_1}$ составляет 4,0. Видно, что

уширения исследованных линий не изменяются при работе подшипника вплоть до 100 часов, а их отношение в пределах погрешности совпадает с отношением $\frac{\text{tg}\vartheta_2}{\text{tg}\vartheta_1}$. На рис. 7 для примера приведены графики Холла при аппроксимации дифракционных профилей функциями Гаусса для исходного состояния и после 100 часов работы. По углу наклона графиков можно оценить уровень микродеформаций ε в исходном состоянии ($\sim 8,3 \cdot 10^{-3}$) и после 100 часов работы ($\sim 8,7 \cdot 10^{-3}$). Такому уровню микродеформаций соответствует плотность хаотически расположенных дислокаций $\rho \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, оцененная по формуле $\rho = \frac{K(2\langle\varepsilon\rangle)^2}{b^2}$, где $K \approx 10$; b — вектор Бюргерса дислокации.

Таким образом, установлено, что поверхностный слой обоймы упорного роликового подшипника в исходном состоянии находится под действием симметричных сжимающих остаточных макронапряжений. В

Физическое уширение дифракционных линий (110) и (310) и их отношение в исходном состоянии и в процессе работы

	β_1 (110), град.	β_2 (310), град.	β_2/β_1
Исходное состояние	0,86	3,1	3,6
10 часов обработки	0,85	3,2	3,8
20 часов обработки	0,85	3,1	3,6
30 часов обработки	0,83	3,1	3,7
40 часов обработки	0,84	3,1	3,7
50 часов обработки	0,84	3,0	3,6
60 часов обработки	0,84	3,1	3,7
70 часов обработки	0,83	3,2	3,9
80 часов обработки	0,84	3,1	3,7
90 часов обработки	0,84	3,3	3,9
100 часов обработки	0,85	3,3	3,9

процессе трения под действием анизотропии силового фактора симметричное плоско-напряженное состояние переходит в несимметричное.

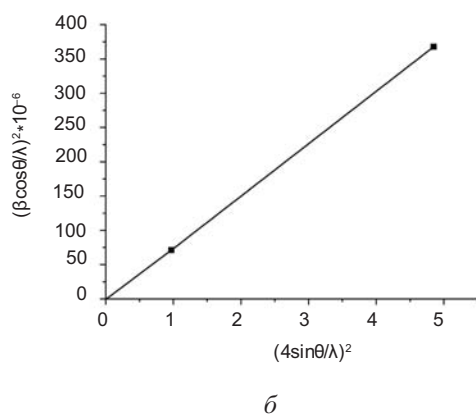
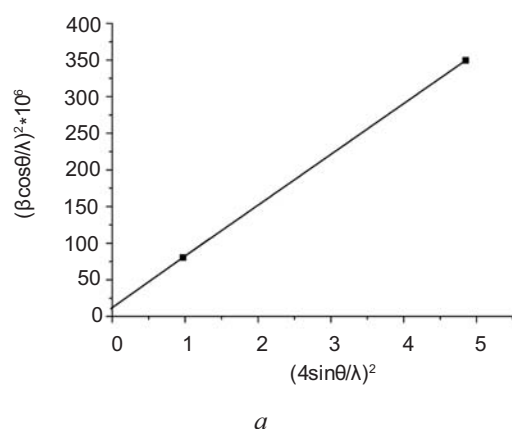


Рис. 7. График Холла при аппроксимации дифракционных профилей функцией Гаусса: *a* — исходное состояние, *б* — после 100 часов работы

Величина тангенциальных напряжений уменьшается, а радиальных увеличивается, достигая предела прочности исследуемой подшипниковой стали. Изменение уровня остаточных макронапряжений обусловлено пластической деформацией в поверхностном слое, однако изменений дисперсности и уровня микродеформаций не обнаружено. Это означает, что реализуется ситуация, при которой зарождение, движение и исчезновение дислокаций происходит при неизменной плотности хаотически расположенных дислокаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
2. Noyan I. N., Cohen J. B. Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation Springer-Verlag. — New York, 1987. — 274 с.
3. Фукс М. Я., Беззубенко Н. К., Свердловва Б. М. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовской обработки. — Киев: Вища школа, 1978. — 157 с.
4. Свойства элементов. Часть 1. Физические свойства / Под редакцией Самсонова Г. В. — М.: Metallurgy, 1976. — 600 с.
5. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. — Киев:

- Наукова думка, 1982. — 288 с.
6. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
 7. Тартаковская И. Х., Сverdlova B. M., Фукс М. Я. Об общности остаточного напряженного состояния после точения, шлифования и трения. Сб. Резание и инструмент, «Вища школа». — 1974. — Вып. 11. — С. 22–27.
 8. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. — М.: МИСиС, 1994. — 328 с.
 3. Fuks M. Ya., Bezzubenko N. K., Sverdlova B. M. Sostoyanie poverhnostnogo sloya materialov posle almaznoj i elborovoj obrabotki. — Kiev: Vischa shkola, 1978. — 157 p.
 4. Svojstva elementov. Chast 1. Fizicheskie svojstva / Pod redakciej Samsonova G. V. — M.: Metallurgiya, 1976. — 600 p.
 5. Francevich I. N., Voronov F. F., Bakuta S. A. Uprugie postoyannye i moduli uprugosti metallov i nemetallov. — Kiev: Naukova dumka, 1982. — 288 p.
 6. Marochnik stalej i splavov / Pod obsch. red. V. G. Sorokina. — M.: Mashinostroenie, 1989. — 640 p.
 7. Tartakovskaya I. H., Sverdlova B. M., Fuks M. Ya. Ob obschnosti ostatochnogo napryazhennogo sostoyaniya posle tocheniya, shlifovaniya i treniya. Sb. Rezanie i instrument, «Vischa shkola». — 1974. — Vyp. 11. — P. 22–27.
 8. Gorelik S. S., Skakov Yu. A., Rastorguev L. N. Rentgenograficheskij i elektronno-opticheskij analiz. — M.: MISiS, 1994. — 328 p.

LITERATURA

1. Kragelskij I. V., Dobychin M. N., Kombalov B. C. Osnovy raschetov na trenie i iznos. — M.: Mashinostroenie, 1977. — 526 p.
2. Noyan I. N., Cohen J. B. Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation Springer-Verlag. — New York, 1987. — 274 p.