

УДК 621.923

Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, О. Н. Ворошухо

Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет»,
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99,
220023 Минск, Республика Беларусь, leo-akulovich@yandex.ru

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАВОК С РАДИУСНЫМ ПРОФИЛЕМ

Представлены результаты моделирования топографии магнитного поля в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке беговой дорожки шарикового подшипника. Показано, что охват беговой дорожки полюсным наконечником с обратным радиусом обеспечивает равномерное распределение магнитной индукции в рабочем зазоре. Использование серповидной формы рабочего зазора увеличивает давление ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность. Приводится расчёт величины давления ферроабразивного порошка на локальные участки обрабатываемой поверхности. По результатам экспериментальных исследований показано, что магнитно-абразивная обработка беговой дорожки шарикового подшипника по сравнению с суперфинишированием снижает высоту микронеровностей до двух раз и увеличивает остаточные сжимающие напряжения в среднем на 20%.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка; полюсный наконечник; серповидный зазор; топография магнитного поля; сложнопрофильные поверхности.

Рис. 7. Табл. 3. Библиогр.: 20 назв.

L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, O. N. Voroshuho

Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,
99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, leo-akulovich@yandex.ru

MAGNETIC-ABRASIVE PROCESSING OF CYLINDRICAL RADIUS PROFILE ROLLERS

The results of modeling of the topography of the magnetic field in the working gap are presented in the case of magnetic-abrasive processing of the ball bearing treadmill. It is shown that the coverage of the treadmill with a pole tip with a return radius ensures a uniform distribution of the magnetic induction in the working gap. Using the crescent shape of the working gap increases the pressure of the ferro-abrasive powder on the treated surface. Calculation of the magnitude of the pressure of the ferro-abrasive powder on the local parts of the treated surface is given. According to the results of experimental studies, it has been shown that magnetic-abrasive processing of the ball bearing tread path in comparison with superfinishing reduces the microroughness height up to 2 times and increases the residual compressive stresses by an average of 20%.

Key words: magnetic-abrasive processing; pole tip; crescent gap; topography of the magnetic field; composite surfaces.

Fig. 7. Table 3. Ref.: 20 titles.

Введение. Развитие высокоэффективных технологий изготовления заготовок деталей машин (точная штамповка, прокатка, точное литье, порошковая металлургия и т. п.) все более приближает заготовки к требованиям чертежей самих деталей как по форме, так и по точности. Это особенно актуально для поверхностей сложного профиля и является мотивацией совершенствования финишных способов механической обработки и создания принципиально новых методов, в том числе основанных на ином характере взаимодействия инструмента с поверхностью детали.

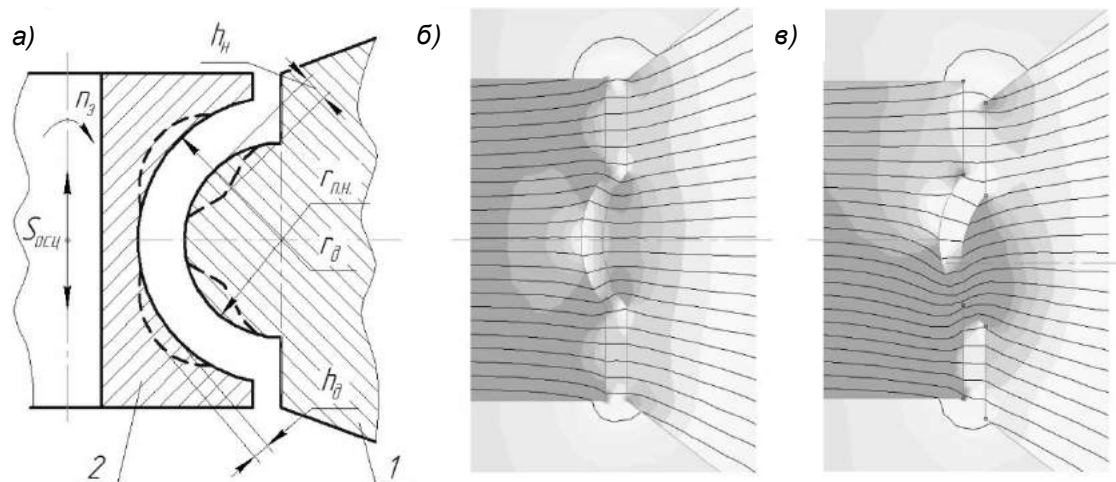
В машиностроительном производстве применяют разнообразные способы формообразования и финишной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей машин с обеспечением заданных параметров точности, шероховатости и физико-механических свойств. В настоящее

время реализация практически всех способов обработки сложнопрофильных поверхностей осуществляется на оборудовании с числовым программным обеспечением (ЧПУ) [1]. При этом для финишной абразивной обработки требуется создание дорогостоящих специальных инструментов, у которых профиль режущего контура должен быть адекватным профилю обрабатываемой поверхности. Однако при обработке поверхностей таким инструментом на отдельных участках с переменной кривизной режимы резания не одинаковые, а также имеет место изменение значений фактических углов резания (переднего, заднего, углов в плане). Это является причиной возникновения погрешностей формы и разброса величин параметров шероховатости. В результате параметры качества на различных участках могут значительно отличаться друг от друга, и для обеспечения требований чертежа могут потребоваться дополнительные доводочные операции, которые, как правило, выполняются вручную и являются трудоемкими.

В конструкциях изделий машиностроения, и особенно в трансмиссии и подвеске мобильных машин, широко используются детали типа тел вращения с рабочими поверхностями, форма которых отличается от цилиндрической (подшипники качения, шарниры рулевого привода, шаровые опоры и т. п.). К рабочим поверхностям таких деталей предъявляются особо высокие требования как по точности формы и величине параметров шероховатости, так и по показателям физико-механических свойств поверхностного слоя. Так, например, в шарикоподшипниках основная рабочая поверхность — дорожка качения — испытывает циклические напряжения под действием переменных контактных нагрузок, что вызывает контактную усталость. Поэтому долговечность дорожки качения колец шарикоподшипников в значительной мере зависит от точности геометрической формы (волнистость, некруглость и т. п.) и шероховатости поверхности. Образование волнистости всегда сопровождается неравномерностью распределения шероховатости и микротвердости на вершинах и впадинах волн, что составляет дополнительный источник разрушения поверхности при эксплуатации [2].

Особое место в конструкциях машин занимают цилиндрические канавки с радиусным профилем, которые используют в подшипниках качения, в узлах гидроаппаратуры для уплотнения подвижных и неподвижных соединений и т. п. Ниже рассматриваются финишные способы обработки цилиндрических канавок с радиусным профилем на примере беговых дорожек шариковых подшипников качения. При изготовлении колец шарикоподшипников помимо показателей качества поверхностей должны достигаться высокая производительность и экономичность изготовления шарикоподшипников. В технологии производства шарикоподшипников заключительной операцией обработки дорожки качения является финишная абразивная обработка, в основном это суперфиниширование. После заключительной операции поверхность дорожки качения должна иметь шероховатость R_a не более 0,16 мкм, допуск круглости — не более 2 мкм, волнистость поверхности — не более 0,2 мкм. Суперфиниширование удаляет только неровности исходного микропрофиля, а погрешности макрогеометрии остаются, поэтому необходимая точность контура должна быть обеспечена на предшествующих операциях. Одинаковую высоту микронеровностей обеспечить на предшествующих операциях технологически затруднительно, поэтому на различных участках поверхности имеет место разная высота микронеровностей профиля. Таким образом, при использовании суперфиниширования для обработки точных поверхностей сложного профиля имеет место неравномерный съем металла с различных участков профиля.

Решение проблемы кроется в использовании гибких инструментов, режущий контур которых формируется в процессе обработки под действием энергии магнитного поля, и разработке новых технологий, позволяющих обрабатывать материалы с высокими механическими свойствами без применения больших динамических усилий. К числу таких технологий относится магнитно-абразивная обработка (МАО) [3—5], которая обеспечивает получение шероховатости поверхности $R_a = 0,01 \dots 0,4$ мкм. По сравнению с традиционными способами абразивной обработки МАО способствует образованию высокого качества поверхности и структуры поверхностного слоя за счет невысокой температуры в зоне резания. Формирование контура режущего инструмента из частиц ферроабразивного порошка (ФАП) при МАО происходит под действием магнитного поля.



1 — полюсный наконечник; 2 — внутреннее кольцо подшипника;

r_d — радиус дорожки; $r_{п.н.}$ — радиус полюсного наконечника; h_n , h_d — локальные отклонения геометрических форм полюсного наконечника и беговой дорожки соответственно

Рисунок 1. — Схема МАО беговой дорожки кольца подшипника (а); топография магнитного поля в среднем (б) и крайнем (в) положениях рабочего зазора при осцилляции

Результаты исследований и их обсуждение. Силовой характеристикой магнитного поля (величиной магнитной индукции B), определяющей эффективность воздействия на частицы ФАП по длине образующей детали, можно управлять изменением формы рабочего зазора за счет профилирования полюсного наконечника. Установлено, что с чем меньшими рабочими зазорами ведется обработка, тем эффективнее влияние величины зазора на геометрическую точность обработанной поверхности. Например, в работе [6] предложена и исследована схема МАО с прямолинейным вдоль оси детали 2 движением осцилляции при обработке внутренних колец подшипников (рисунок 1). При этом были использованы полюсные наконечники 1 с профилем рабочих поверхностей, эквидистантной обрабатываемой поверхности.

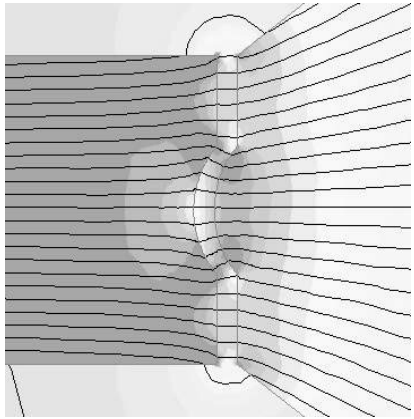
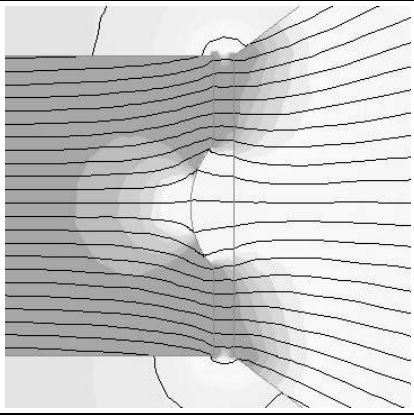
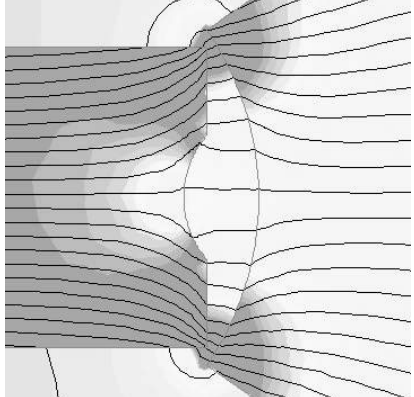
Исследования топографии магнитного поля в рабочем зазоре при МАО беговой дорожки шарикоподшипника с относительным осциллирующим движением полюсных наконечников электромагнитов показывают, что формируемое магнитное поле в среднем и крайних положениях рабочего зазора (см. рисунок 1, б и в) вызывает миграцию частиц ФАП вдоль из правой части рабочего зазора в левую и наоборот. Причиной наблюдаемой миграции является разрыв цепочек частиц на периферийных участках профиля рабочего зазора при движении осцилляции. В результате значительная часть порошка переносится с поверхностью детали из одного рабочего зазора в другой и непрерывно перераспределяется по длине профиля в рабочем зазоре.

Однако различным участкам дуги профиля соответствует разная интенсивность миграции частиц и, следовательно, различное режущее воздействие частиц ФАП на обрабатываемую поверхность. При сближении полюсного наконечника и обрабатываемой поверхности при осцилляции (см. рисунок 1, б и в) происходит периодическое уплотнение порошка на боковых участках профиля. Это приводит к интенсификации процесса резания на этих участках и, как следствие, к локальным отклонениям (глубиной до 0,5...1 мкм) геометрических форм как беговой дорожки h_d внутреннего кольца подшипника, так и полюсного наконечника h_n .

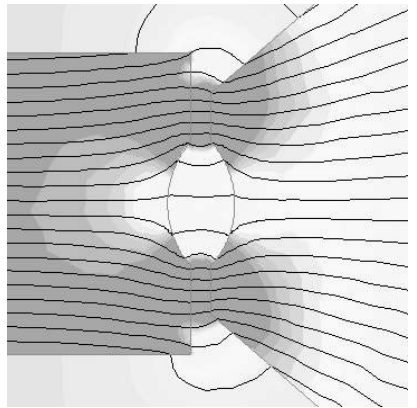
Для обеспечения равномерности съема металла с различных участков профиля беговой дорожки подшипника были проведены исследования по влиянию формы полюсного

наконечника на однородность магнитного поля в рабочей зоне при МАО беговой дорожки. Были проведены исследования четырех видов формы полюсного наконечника путем компьютерного моделирования топографии магнитного поля в рабочем зазоре, основанного на расчете величин магнитной индукции по методу конечных элементов, с использованием программы Femm. Рассмотрим топографию магнитного поля в рабочем зазоре (рисунок 2), и результаты моделирования (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Формы профиля полюсных наконечников

Профиль наконечника		Топография магнитного поля в рабочем зазоре	Величина магнитной индукции в зоне беговой дорожки B , Тл	Распределение магнитной индукции по контуру беговой дорожки подшипника B , Тл	
номер	вид			по краям дорожки	в центре
1	Эквидистантный		0,9...1,2	1,2	0,9
2	Плоский		0,85...0,45	0,85	0,45
3	Радиусный с охватом ширины кольца		0,35...0,3	0,35	0,3

Окончание таблицы 1

Профиль наконечника		Топография магнитного поля в рабочем зазоре	Величина магнитной индукции в зоне беговой дорожки B , Тл	Распределение магнитной индукции по контуру беговой дорожки подшипника B , Тл	
номер	вид			номер	вид
4	Радиусный с охватом ширины дорожки		0,5...0,6	0,6	0,5

Моделированием магнитного поля установлено, что эквидистантные полюсные наконечники (см. таблицу 1, вид 1), которые использовались в работе Л. К. Минина [6] при обработке дорожки подшипника, обеспечивают неравномерную обработку по периметру дорожки из-за наличия концентраторов магнитной индукции по краям беговой дорожки. Величина магнитной индукции по краям беговой дорожки имеет максимальное значение, а к центру уменьшается. Для равномерной обработки беговой дорожки необходимо обеспечить равномерную величину индукции магнитного поля по периметру беговой дорожки подшипника.

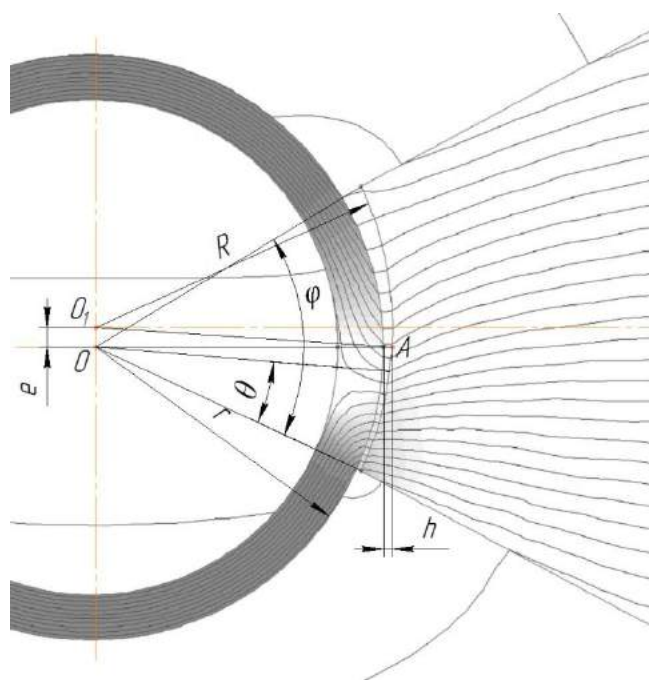


Рисунок 2. — Схема топографии магнитного поля при серповидной форме рабочего зазора при МАО беговой дорожки кольца подшипника

Исследование топографии магнитного поля в рабочем зазоре с плоскими полюсными наконечниками (см. таблицу 1, вид 2) показало, что величина магнитной индукции в беговой дорожке будет иметь меньшее значение, так как концентраторами выступают цилиндрические поверхности кольца подшипника и при этом величина магнитной индукции от центра беговой дорожки к её краям является неравномерной.

В рабочем зазоре с радиусными полюсными наконечниками с охватом ширины кольца (см. таблицу 1, вид 3) величина магнитной индукции равномерна по периметру беговой дорожки, но не достигает требуемой величины для удержания ферроабразивного порошка, весь порошок концентрируется в зоне цилиндрических поверхностей.

Исполнение радиусных полюсных наконечников с охватом ширины дорожки (см. таблицу 1, вид 4), позволило получить требуемую величину магнитной индукции по периметру беговой дорожки с сохранением её равномерности. В зонах, где форма полюсного наконечника эквидистантна форме обрабатываемого кольца подшипника, величина магнитной индукции имеет наибольшее значение, что создаёт «запирающие» зоны и не даёт ФАП выйти из зоны обработки беговой дорожки. В зоне обработки беговой дорожки величина магнитной индукции в 2 раза меньше, чем в «запирающих» зонах.

По результатам исследований топографии магнитного поля предложена и реализована схема обработки беговых дорожек внутренних колец подшипников качения (рисунок 3, а). В представленной схеме для обработки используются серповидные полюсные наконечники с радиусным охватом ширины дорожки подшипника.

При МАО в серповидном рабочем зазоре (см. рисунок 2) на отдельные участки поверхности воздействует различное по величине давление ферроабразивной «щетки», адекватное величине градиента магнитного поля.

Величина зазора в диаметральной сечении имеет различное значение, что резко изменяет градиент магнитной индукции по высоте рабочей зоны. Неравномерность распределения магнитного потока в различных частях рабочей зоны усиливается концентрацией ферроабразивного порошка в серповидном воздушном зазоре.

Математическое моделирование заключается в расчете величины давления ФАП на обрабатываемую деталь в рабочем зазоре. Рассмотрим схему МАО с полюсными наконечниками, имеющими конфигурацию в соответствии с предлагаемым расчетом по величине силы, приходящейся на единицу площади обрабатываемой поверхности детали.

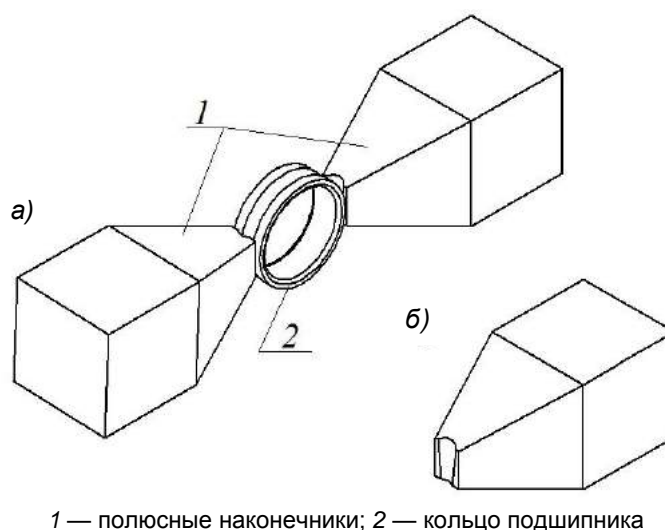


Рисунок 3. — Схема МАО беговых дорожек внутреннего кольца подшипника (а) и профиль полюсного наконечника (б)

Деталь помещается в рабочую зону, пространство которой между полюсными наконечниками и ее поверхностью заполняется ФАП (см. рисунок 2). Обозначим угол охвата полюсного наконечника электромагнита φ , величина которого изменяет давление ФАП на обрабатываемую поверхность. Расстояние OO_1 является эксцентритетом e .

Обозначим через $c = R - r$ средний зазор между деталью и полюсным наконечником, от которого производится отсчет угловой координаты некоторой точки внутри рабочего зазора. Тогда для $OA O_1$

$$OA = r + h = e \cos \theta + \sqrt{(r + c)^2 - e^2 \sin^2 \theta} = e \cos \theta + (r + c) \sqrt{1 - \left(\frac{e}{r + c}\right)^2 \sin^2 \theta},$$

где $e \approx c$ и поскольку $R \gg e$, то $\frac{e^2}{(r + c)^2}$ пренебрежимо мало и может быть исключено из дальнейшего рассмотрения. В результате имеем:

$$\frac{h}{c} = 1 + \left(\frac{e}{c}\right) \cos \theta. \quad (1)$$

Отношение $\frac{h}{c}$ или ε является относительным эксцентриситетом. Считаем, что высота детали велика по сравнению с радиусом R и поэтому не учитываем краевые эффекты. Считаем, что $x = r\theta$ и полагаем, что согласно [7],

$$\frac{dp}{d\theta} = 6\eta Vr \frac{h - h_0}{h^3}, \quad (2)$$

где V — скорость вращения детали, м / с;

h_0 — значение величины рабочего зазора, при котором давление $p = \max$.

Подставляя h из уравнения (1) в (2) и, интегрируя, получаем

$$p = \frac{6\eta Vr}{c^2} \left[\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{h_0}{c} \int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right]. \quad (3)$$

Поскольку ферроабразивная «щетка» выдерживает только определенные давления, то следует принимать реалистические граничные условия, заключающиеся в установлении

области $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ $p = 0$ при $\theta = 0$ и $\theta = \theta_2$.

$$\frac{dp}{d\theta} = 0 \text{ при } \theta = \theta_1 \text{ и } \theta = \theta_2.$$

Используя метод замены переменных [8], определяем интегралы в выражении (3), что позволяет найти давление p :

$$p = \frac{6\eta Vr}{c^2} \left[\frac{\varepsilon(2 + \varepsilon \cos \theta) \sin \theta}{(2 + \varepsilon^2)(1 + \varepsilon \sin \theta)^2} \right].$$

Для определения давления необходимо установить, какая сила действует на конкретный локальный участок обрабатываемой поверхности. Чтобы найти это значение, рассмотрим элементарную площадь dA , соответствующую $dA \cos \theta$ и $dA \sin \theta$, — вдоль линии центров OO_1 и перпендикулярностей. Силу F , приходящуюся на единицу площади dA , раскладываем на $F \sin \theta$ и $F \cos \theta$, и поскольку $F \sin \theta$ представляет тангенциальную составляющую, производящую удержание частиц ФАП в рабочем зазоре, то рассмотрению она не подлежит. Основным интерес представляет нормальная составляющая $F \cos \theta$ ввиду того, что ее воздействие на обрабатываемую поверхность определяет эффективность съема материала.

Угол φ определяется габаритными размерами и профилем полюсного наконечника, а угол θ характеризует зону резания на участке серповидного зазора, величина которой в зависимости от вида серповидного зазора может иметь различные значения.

Чтобы найти угол φ , предлагается соотношение

$$F \cos \theta = Br \int_0^{\frac{\pi}{2}} p \cos \theta d\theta = Br \left(p \sin \theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dP}{d\theta} \sin \theta d\theta \right) = Br \left(p - 6\eta V r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{h - h_0}{h^2} \sin \theta d\theta \right) = \\ = Br p - 6\eta V Br^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{h - h_0}{h^2} \sin \theta d\theta.$$

Согласно выражению (4),

$$F \cos \varphi = \frac{6\eta V Br^2}{c^2} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{h_0}{c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right) = \\ = \frac{6\eta V Br^2}{c^2} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{h_0}{c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \frac{h_0}{c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right).$$

Опуская ряд промежуточных вычислений, получаем при $\varepsilon < 1$ (серповидный зазор)

$$F \cos \varphi = \frac{6\eta V Br^2}{c^2} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2} - \frac{h_0}{c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta d\theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right) = \\ = \frac{6\eta V Br^2}{c^2} \left(\frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(1 - \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon)}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) - \frac{h_0}{c} \frac{1}{2(1 - \varepsilon^2)} \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left(1 - \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon)}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) + \frac{2\varepsilon}{1 - \varepsilon^2} \left(\varepsilon - \frac{2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - \varepsilon)}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) \right) \right).$$

Таким образом, $F \cos \varphi$ непосредственно определяет силу, с которой ферроабразивная «щетка» воздействует на каждый локальный участок обрабатываемой поверхности, и осуществление ее расчета через геометрические параметры профиля полюсного наконечника позволяет обеспечить качество обработки различных деталей сложного профиля.

Для проверки теоретических положений были проведены экспериментальные исследования. В качестве образцов использовали кольца подшипников $d_{\text{вн}} = 60$ мм из стали 12Х2Н4А (ГОСТ 4543-71) твердостью 61...63 HRC. Финишная обработка деталей по заводской технологии состояла из шлифования и последующего суперфиниширования, по сравнению с которой — из шлифования и МАО.

Согласно специальным техническим условиям структура подшипниковых сталей должна состоять из скрытокристаллического или мелкокристаллического мартенсита и мелких избыточных карбидных включений.

Существенное влияние на износостойкость и усталостную прочность деталей машин оказывают физико-механические свойства поверхностного слоя [9]. Практика и результаты исследований показали, что в некоторых случаях одинаковые по точности и шероховатости поверхности деталей машин имеют различные эксплуатационные свойства [10; 11]. Это объясняется тем, что шероховатость как самостоятельный параметр не может характеризовать физическое состояние поверхностного слоя металла. У поверхностей с одинаковой конечной шероховатостью могут быть неодинаковый характер и величина остаточных напряжений, различная микротвердость. Установлено [12; 13], что каждый метод обработки оказывает определенное воздействие на геометрические параметры и физические свойства поверхностного слоя деталей машин.

Влияние МАО на физическое состояние металла поверхностного слоя обусловлено абразивным резанием (диспергирование металла), пластической деформацией микронеровностей (выглаживание), химическими реакциями (воздействие на металл химически активных веществ, находящихся в рабочей среде), а также электромагнитными и адгезионными явлениями [14]. Это вызывает необходимость проведения исследований влияния ряда технологических факторов МАО на физико-механические свойства поверхностного слоя.

Рассмотрим топографию поверхности деталей после различных операций финишной обработки (рисунок 4). Шероховатость Ra после шлифования, суперфиниширования и МАО составляет 0,6; 0,2 и 0,1 мкм соответственно.

Представим профилограммы поверхностей после таких методов обработки (рисунок 5).



Рисунок 4. — Топография поверхности стали 12Х2Н4А после финишной обработки. ×150

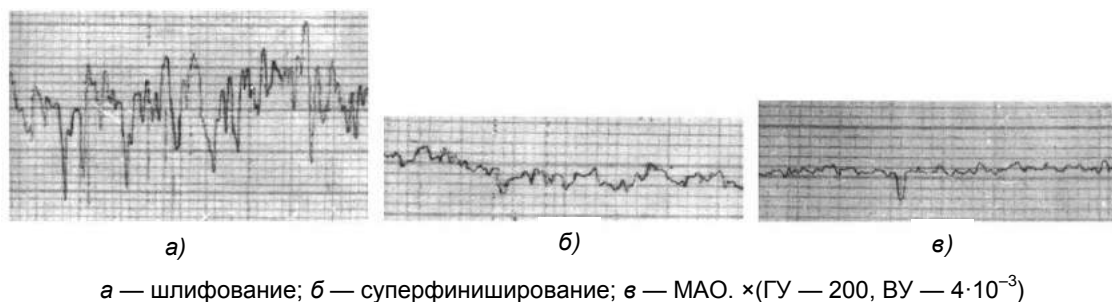


Рисунок 5. — Профилограммы поверхности стали 12Х2Н4 после финишной обработки

Варьирование режимами осуществлялось следующим образом: V — скорость вращения, 5 м / с; δ — рабочий зазор, 1 мм; Δ — зернистость ферроабразивного порошка, 160/200 мкм. Смазочно-охлаждающие технологические средства — СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81.

Переменными факторами являлись: B — магнитная индукция, 0,8...1,1 Тл; t — время обработки, 45...120 с. Оборудование — магнитно-абразивный станок ФАС-1.

При неупорядоченном расположении микронеровностей, образованных традиционными методами обработки, наиболее благоприятным является профиль, обладающий развитой несущей поверхностью [15]. Для обеспечения граничного трения следует иметь оптимальное значение шероховатости поверхностного слоя $Ra = 0,08...0,63$ мкм. Поверхностный слой, образованный при шлифовании имеет большую высоту микронеровностей, чем при суперфинишировании и MAO, что может привести к снижению его несущей способности и повышению вероятности падения давления в масляном слое. MAO образует наиболее приближенный к оптимальному микрорельеф, который, однако, по сравнению с суперфинишированием отличается меньшей упорядоченностью. Вместе с тем сглаживание вершин и впадин микронеровностей увеличивает действительную площадь контакта трущихся поверхностей. Согласно работе [16], контактная жесткость и износостойкость поверхностей тем выше, чем больше их опорная площадь и меньше углы профиля микронеровностей, что и характерно для слоя, созданного MAO.

Рассмотрим исходную структуру стали 12Х2Н4А после цементации, закалки и отпуска (рисунок 6). Данная структура имеет типовую морфологию кристаллов в составе твердого раствора (мартенсита) и полностью отвечает особенностям фазовых мартенситных превращений [17].

При шлифовании высоколегированной закаленной стали в результате вторичной закалки образуется поверхностный слой, имеющий аустенитно-мартенситную структуру. Его структура отличается от структуры стали после обычной закалки повышенным содержанием остаточного аустенита (до 80%) и увеличенным параметром кристаллической решетки. Поскольку пластической деформации в первую очередь подвергаются зерна остаточного аустенита, то в процессе обработки скопления дислокаций сосредотачиваются именно в аустенитной фазе, что часто приводит к образованию микро- и макротрещин. В связи с этим при циклическом воздействии контактных нагрузок деформированные зоны остаточного аустенита служат концентраторами напряжений и способствуют снижению прочности [18].

Представим структуру поверхностного слоя стали 12Х2Н4А после шлифования (а), хонингования (б) и MAO (в) (рисунок 7). При травлении детали после шлифования на ее поверхности выявлены границы зерен остаточного аустенита. Глубина этого слоя составляет 30...50 мкм. Как указывалось выше, в деталях, подвергшихся контактному циклическому нагружению, на последующих финишных операциях следует удалять образовавшийся белый поверхностный слой. После суперфиниширования и MAO структура имеет мелкодисперсное строение с равномерно распределенными мелкими округленными зёрнами карбидов. Такая структура способствует росту контактной прочности и износостойкости и в полной мере соответствует требованиям специальных технических условий.

Представлены данные по определению остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после различных операций финишной обработки (таблица 2). Поскольку при MAO процесс преимущественно носит характер тонкого пластического деформирования, то происходит образование сжимающих напряжений, как и после суперфиниширования.

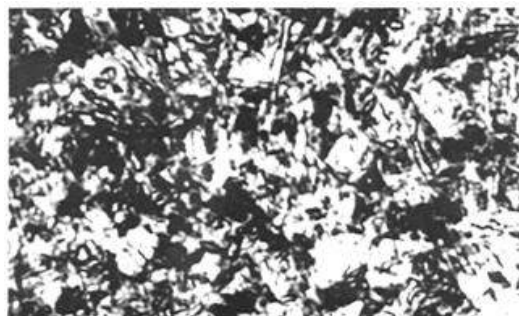


Рисунок 6. — Структура стали 12Х2Н4А после термообработки (цементация, закалка, отпуск). $\times 100$

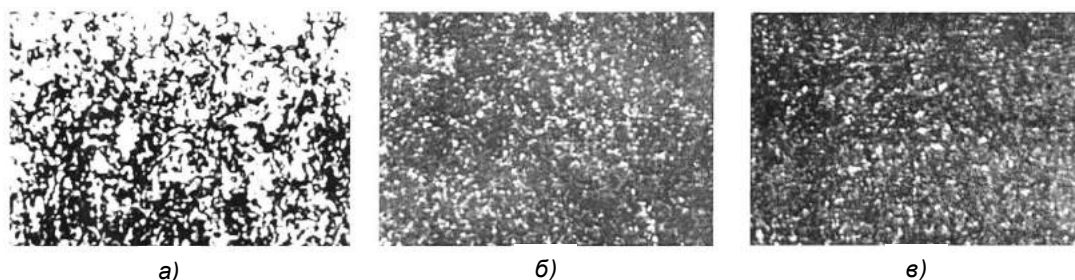


Рисунок 7. — Микроструктура поверхностного слоя

Представим сравнительные результаты определения остаточного аустенита и размеров кристаллической решетки в поверхностном слое деталей после различных методов обработки (таблица 3). Время обработки при MAO в среднем составляет 60 с.

После MAO структура приповерхностного слоя преобразовалась в мелкодисперсную с трудноразличимыми размерами зерен. Карбиды пластинчатой формы исчезли, превратившись в мелкие округлые зерна, равномерно распределенные по всему полю косо шлифа.

Т а б л и ц а 2. — Величина остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое после различных методов финишной обработки

Метод обработки	Величина остаточных напряжений, МПа
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	660
Шлифование	750
Суперфиниширование	810
Магнитно-абразивная обработка	980

Т а б л и ц а 3. — Влияние метода финишной обработки на количество остаточного аустенита и величину блоков когерентного рассеяния

Метод обработки	Остаточный аустенит, %	Размер областей когерентного рассеяния, нм
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	20,7	36,7
Шлифование	25,1	48,2
Суперфиниширование	16,2	43,9
MAO	14,8	42

Применение таких финишных операций, как суперфиниширование и MAO, приводит к устранению дефектного слоя глубиной 50 мкм и образованию характерного микрорельефа и структуры поверхности, обеспечивающих более качественные характеристики материала по сравнению со шлифованием. В отличие от суперфиниширования, MAO обеспечивает увеличение остаточных сжимающих напряжений на поверхности деталей в среднем на 20% при равных размерах областей когерентного рассеяния.

Уменьшение содержания остаточного аустенита при MAO обусловлено деформациями, возникающими в поверхностном слое при обработке, так как остаточный аустенит имеет низкую устойчивость в условиях деформации даже при небольших температурах. Кроме того, при MAO удаляется искаженный шлифованием поверхностный слой, который характеризуется большим количеством остаточного аустенита, чем матрица.

Исследованиями [19; 20] установлено, что если превалирует фактор теплового воздействия, то в поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения I рода. Проведенные исследования показывают: при MAO в тонком поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия, а это свидетельствует, что основной причиной их возникновения является пластическая деформация при резании.

Характеристики тонкой кристаллической структуры поверхностного слоя (остаточные напряжения II рода и блоки когерентного рассеивания) значительно влияют на прочность металлов и сплавов. Состояние высокой прочности сталей и сплавов характеризуется наличием больших искажений решетки и значительной дисперсностью блоков. Наибольшее влияние на остаточные напряжения II рода и дисперсность блоков когерентного рассеивания оказывают магнитная индукция в рабочем зазоре и зернистость порошка, меньшее влияние — время обработки.

Величина и характер распределения остаточных напряжений I рода по глубине поверхностного слоя после MAO показали, что в тонком поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия, достигающие 1,1 ГПа. Максимальные значения напряжения имеют непосредственно у поверхности и снижаются до 0 на глубине 10 мкм.

Заключение. По результатам исследований топографии магнитного поля реализована схема обработки беговых дорожек внутренних колец подшипников качения, в которой для обработки используются серповидные полюсные наконечники с радиусным охватом ширины дорожки подшипника. Реализация данной схемы обработки при проведении экспериментов обеспечила равномерный процесс микрорезания по всей периферии беговой дорожки подшипника и увеличила качество поверхности в 2 раза по сравнению с суперфинишированием. Произведён математический расчёт величины давления ФАП на обрабатываемую поверхность.

Проведённые исследования, показали, что MAO обеспечивает увеличение остаточных сжимающих напряжений на поверхности деталей в среднем на 20% при равных размерах областей когерентного рассеивания. После MAO структура имеет мелкодисперсное строение с равномерно распределенными мелкими округленными зёрнами карбидов, что способствует росту контактной прочности и износостойкости деталей машин.

Список цитируемых источников

1. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. — Минск : Беларус. навука, 2014. — 375 с.
2. Финишная обработка поверхностей / С. А. Клименко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. — Минск : Беларус. навука, 2017. — 377 с.
3. Коновалов, Е. Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич. — Минск : Наука и техника, 1974. — 272 с.
4. Wantuch, E. Magnetic-abrasive Beatbeitung / E. Wantuch, H. Zutze // New Fertigungs technologies. — 2002. — No. 5. — S. 232—237.
5. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. — Минск : Физико-техн. ин-т, 1997. — 416 с.
6. Минин, Л. К. Магнитно-абразивное полирование наружных поверхностей вращения высокоточных деталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. К. Минин. — Минск : Акад. наук БССР, 1975. — 24 с.
7. Мур, Д. Основы применения трибоники / Д. Мур. — М. : Мир, 1978. — 482 с.
8. Никольский, С. М. Курс математического анализа / С. М. Никольский. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 592 с.
9. Подшипники качения. Справочник / под ред. В. Н. Нарышкина, Р. В. Коросташевского. — М. : Машиностроение, 1984. — 280 с.
10. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. — М. : Машиностроение, 1989. — 328 с.
11. Трение, изнашивание и смазка. Справочник : в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. — Кн. 1. — М. : Машиностроение, 1978. — 400 с.

12. Никифоров, А. Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения / А. Д. Никифоров. — М. : Высш. шк., 2006. — 356 с.
13. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. — Минск : Высш. шк., 1990. — 416.
14. Yascheritsin, P. I. The comparative appraisal of quality characteristics of holes after different finishing methods / P. I. Yascheritsin, L. E. Sergeev, M. I. Sidorenko // Adv. Perform. Mater, 1997. — Vol. 4. — No. 3. — P. 337—347.
15. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. — Минск : Наука и техника, 1981. — 326 с.
16. Ящерицын, П. И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. — Минск : Наука и техника, 1973. — 148 с.
17. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник : в 2 т. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. — М. : Металлургия, 1991. — Т. 1, кн. 2. — 462 с.
18. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / А. Н. Резников [и др.] ; под ред. А. Н. Резникова. — М. : Машиностроение, 1977. — 390 с.
19. Кулаков, Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. — М. : Машиностроение, 1979. — 216 с.
20. Ящерицын, П. И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П. И. Ящерицын. — Минск : Наука и техника, 1974. — 606 с.

Поступила в редакцию 15.03.2018