

СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Установлена взаимосвязь контактных давлений, несущей способности, износостойкости и коэффициента трения от стереометрических характеристик и физико-механических свойств износостойких порошковых материалов антифрикционного назначения. Определена роль каждой структурной составляющей в процессе трения и обоснованы их параметры.

Ключевые слова: порошок, антифрикционный материал, износостойкость, коэффициент трения, прочность, теплопроводность, твердая смазка, интерметаллидная фаза, стереометрия.

Антифрикционные материалы с низким коэффициентом трения – наиболее распространенный вид продукции порошковой металлургии. Основным свойством, обуславливающим широкое применение этих материалов в технике, является их способность работать продолжительное время без дополнительной подачи смазки, т.е. в режиме так называемой “самосмазываемости”. Однако попытки применения пористых материалов в узлах трения при чрезмерно легких (нагрузки и скорости соответственно менее 0,1 МПа и 0,1 м/с) и тяжелых (соответственно более 10 МПа и 4...10 м/с) режимах работы не увенчались успехом.

Основной причиной выхода из строя пористых деталей машин является схватывание, возникающее при достижении внешней нагрузки или скорости скольжения критических величин. В связи с этим в подшипниках скольжения широкое применение находят твердые смазки (сульфиды, селениды, фториды, фосфиды и т.д.), которые образуют на поверхности трения защитные пленки (вторичные структуры) и сохраняют работоспособность узлов трения в возможно большом диапазоне скоростей и нагрузок, в том числе и экстремальных.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является установление взаимосвязи контактных давлений, несущей способности, износостойкости и коэффициента трения от стереометрических характеристик и физико-механических свойств износостойких порошковых материалов антифрикционного назначения.

С точки зрения стереометрического материаловедения, оптимальный выбор количества и геометрических характеристик структурных фаз в материале

обеспечивает не только высокие триботехнические, но и физико-механические свойства. Матрица должна обладать высокой упругостью и обеспечивать износостойкость, воспринимая на себя всю внешнюю нагрузку.

Известно [1], что износостойкость и работоспособность материала находятся в прямой зависимости от его твердости. Удовлетворение этих требований обеспечивается легированием, сохраняя упругость основы. В работе [2] отмечается, что металлы упрочняются намного сильнее при легировании элементами, которые располагаются между узлами решетки (атомы внедрения), чем при легировании элементами, замещающими атомы матрицы. Атомы внедрения вызывают тетрагональное искажение решетки и активнее взаимодействуют с краевыми и винтовыми дислокациями, чем атомы замещения. Следовательно, целесообразно в структуре износостойких антифрикционных порошковых материалов (ИАПМ) иметь фазу-основу в виде твердого раствора внедрения. В этом случае легирующие элементы выбираются с учетом обеспечения ограниченной растворимости и образования интерметаллидных соединений, которые в структуре материала будут выполнять роль третьей фазы.

Так, для легирования ИАПМ на железной основе целесообразно использовать W и Mo. Эти элементы, растворяясь до 3% в матрице, образуют твердый раствор внедрения в α -Fe, поскольку различие атомных размеров составляет ~50% ($d_{Fe}=0,26\text{ нм}$, $d_{Mo}=0,13\text{ нм}$, $d_W=0,13\text{ нм}$), а электронная концентрация в Fe ($c/a=1/4$) намного меньше, чем в Mo ($c/a=3/4$) и W ($c/a=3/4$). Избыточное содержание этих элементов образует устойчивые интерметаллидные соединения (Fe_3W_2 , Fe_3Mo_2), так как их электромеханические потенциалы существенно отличаются друг от друга: если для железа $\varepsilon_H^0 = 0,036\text{ В}$, то для молибдена $\varepsilon_H^0 = -0,2\text{ В}$ и вольфрама $\varepsilon_H^0 = -1,1\text{ В}$.

Рассмотрим обеспечение свойств, предъявляемых к ИАПМ с точки зрения стереометрического материаловедения. Известен ряд работ [3, 4], в которых показана зависимость физико-механических свойств металлов и сплавов от величины удельной поверхности зерен. В данном случае представляет интерес зависимость износостойкости и допустимой нагрузки от величины удельной поверхности зерен. Как и следовало ожидать (рис. 1), с увеличением удельной поверхности зерен матрицы значительно возрастают допустимая нагрузка и износостойкость материала, т.е.

$$I = I_0 - a \sum S, \quad Q = Q_0 + b \sum S,$$

где I_0 , Q_0 – свойства материала, когда размеры зерен матрицы составляют ~250 мкм; а, b – коэффициенты, зависящие от свойств материала.

Например, для FeMo сплава, содержащего 3%Mo, $a=0,3$, $b=0,1$. Это объясняется тем, что механические свойства мелкозернистой структуры выше, чем крупнозернистой.

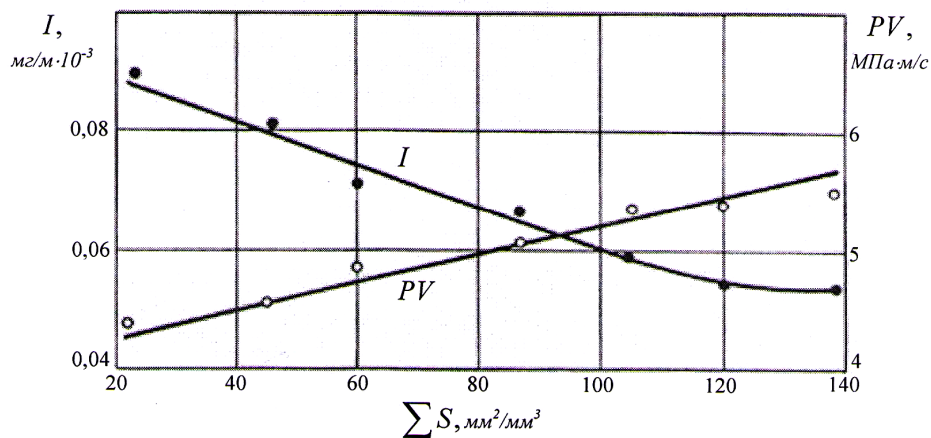


Рис. 1. Износостойкость и несущая способность ИАПМ в зависимости от величины удельной поверхности зерен матрицы (Fe-Mo-MoS₂, Q=1 МПа, V=1 м/с, трение сухое)

Как показано на рис. 1, уменьшение зерен матрицы ($\Sigma S < 140$) не приводит к повышению износостойкости (это целесообразно и по технологическим соображениям), что, по нашему мнению, обусловлено снижением теплопроводности материалов. Это подтверждается результатами экспериментов, приведенными на рис. 2. Как видим, увеличение удельной поверхности зерен от 14 до 120 mm^2/mm^3 у сплавов на железной основе уменьшает коэффициент теплопроводности на 15...16% (от 0,25 до 0,21 $\text{кал}(10^{-2}/\text{м}(\text{с}(\text{град})))$, а на медной основе - на 18...20% (от 0,4 до 0,29 $\text{кал}(10^{-2}/\text{м}(\text{с}(\text{град})))$). Анализ рис. 1 и 2 показывает, что оптимальный размер зерен матрицы составляет ~50 мкм.

Результаты исследований будут иметь большую значимость, если учесть и условия работы узла трения, т.е. влияние нагрузки (Q) и скорости (V). С этой целью выполнена математическая обработка полученных нами экспериментальных данных:

$$I = I_0 + K \left[\frac{0,5(2 + V)(1 + 0,01 Q)}{V} \right] \Sigma S, \quad (1)$$

где K – коэффициент, зависящий от свойств материала; для сплавов на железной основе K=0,5, на медной основе K=0,6.

Анализ выражения (1) показывает, что нагрузка оказывает прямое влияние на величину износа, тогда как влияние скорости неоднозначно. Износ имеет минимальное значение при V=1...2 м/с.

Для расчета сил взаимодействия между двумя контактирующими металлическими поверхностями можно использовать следующее выражение [3]:

$$F = \frac{0,013}{H^4} \cdot 10^{-1}, \text{ Н/м}^2, \quad (2)$$

где F – сила притяжения на единицу площади фактического контакта; H – расстояние (зазор) между поверхностями, мкм .

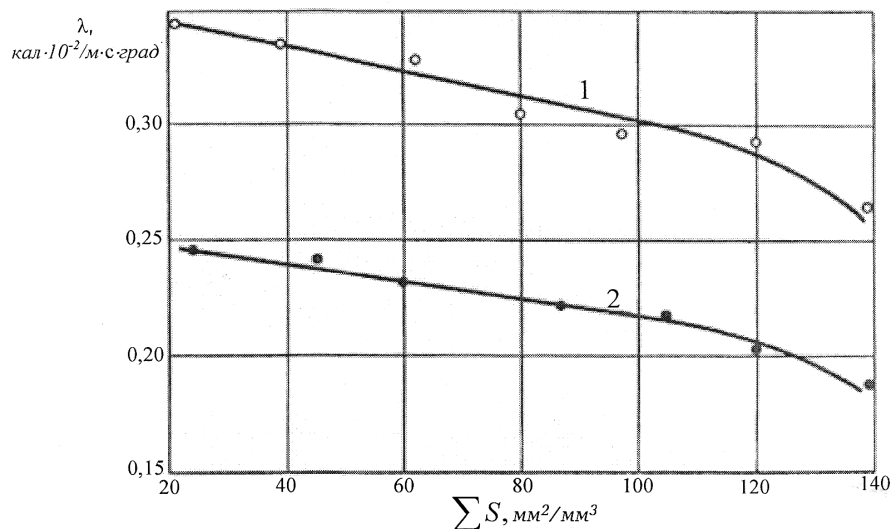


Рис. 2. Теплопроводность ИАПМ в зависимости от величины удельной поверхности зерен: 1 – на основе меди (Cu-P-S); 2 – на основе железа (Fe-Mo-MoS₂)

В узлах трения между трущимися поверхностями “размещают” промежуточный материал толщиной H , который препятствует силам взаимодействия ($F \rightarrow 0$), а следовательно, обеспечивает низкий коэффициент трения. К таким материалам относятся жидкие смазки. В рассмотренных структурах, которые предназначены для узлов трения с сухой и граничной смазкой, таким материалом является вторая фаза (твердые смазывающие вещества).

Известно, что спад напряжения в теле, т.е. его релаксация, выражается уравнением [4]

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T}, \quad (3)$$

из которого вытекает, что чем меньше период релаксации T , тем меньше напряжения τ , вызывающие деформацию, по сравнению с исходным τ_0 . В таких условиях твердое тело ведет себя как вязкая жидкость. Подобными свойствами обладают твердые смазывающие вещества (сульфиды, фосфиды, селениды и др.), период релаксации которых очень мал (на порядок ниже жидкости) и определяется зависимостью

$$T = f(\sigma_T / G), \quad (4)$$

где T – период релаксации; τ – напряжение текучести; G – модуль сдвига (модуль упругости второго рода).

В материалах, применяемых в качестве твердых смазывающих веществ, значения σ_T низкие, так как $\sigma_T \approx \tau / \frac{dV_x}{dy}$, т.е. под воздействием малых касательных напряжений (($\frac{dV_x}{dy}$ – соотношение dV_x/dy большое.

Исходя из этих соображений, рассмотрим механизм выделения смазывающего вещества между трущимися поверхностями в зависимости от структуры материалов. Механизм выделения твердого смазывающего вещества можно объяснить различием коэффициентов объемного расширения отдельных фаз [5]. Между фазами возникают напряжения. Как видно из рис. 3, зерна второй фазы и матрицы взаимно испытывают сжимающие напряжения σ_M и $\sigma_{T.C}$.

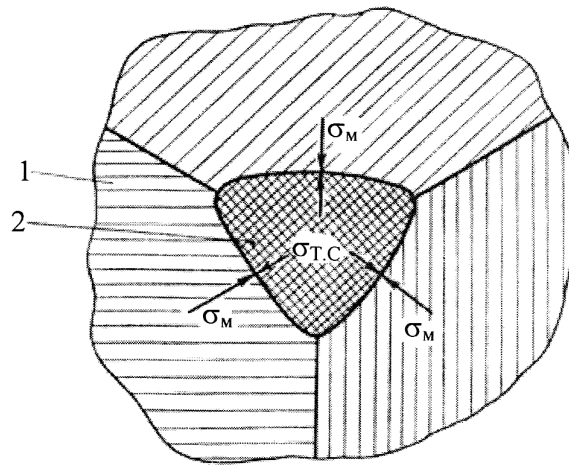


Рис.3. Схема напряженного состояния между фазами в структуре материала: 1–первая фаза (основа материала); 2–вторая фаза (твердая смазка)

При условии

$$\sigma_M - \sigma_{T.C} > \tau_{T.C} \quad (5)$$

произойдет выделение второй фазы ($\tau_{T.C}$ – напряжение скольжения), фактический объем которого можно определить по формуле

$$V_\Phi = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \beta_1 TV_1' + \beta_2 TV_2, \quad (6)$$

где ΔV_1 – расширенный объем зерна основы; ΔV_2 – расширенный объем зерна второй фазы; β_1, β_2 – коэффициент объемного расширения основной и второй фазы; T – температура в зоне трения; V_1' – часть объема зерна основной фазы, контактируемая с зернами второй фазы; V_2 – объем зерна второй фазы.

Поскольку связь между зернами основной и второй фаз осуществляется по контактирующим поверхностям, то

$$V_1' = V_1 \frac{r^2}{3R^2}, \quad (7)$$

где V_1 – объем зерна основной фазы; R – средний радиус зерен основной фазы; r – средний радиус зерен второй фазы.

После преобразования выражение (6) для всей поверхности трения примет вид

$$V_\Phi = 1,3\pi TKr^2 m (\beta_1 R + \beta_2 r), \quad (8)$$

где m – количество зерен второй фазы; K – коэффициент оксидирования (для неблагородных металлов $K=1,1...1,3$ [6]).

Чтобы количество выделившейся второй фазы V_p было достаточным для формирования вторичной структуры, необходимо следующее условие:

$$V_\Phi \geq V_p, \quad V_p = SH, \quad (9)$$

где S – поверхность трения; H – необходимая толщина образующейся вторичной структуры.

Величину H можно определить из формулы (2), т.е. $H \geq 0,1$ мкм. Следовательно, из условия (9) можно записать

$$n \geq \frac{1,3\pi TKr^2 m (\beta_1 R + \beta_2 r)}{S}, \quad 0,1S \leq 1,3\pi TKrm (\beta_1 R + \beta_2 r). \quad (10)$$

Определив необходимое количество зерен второй фазы на единицу поверхности (n), можно вычислить процентный состав в объемных единицах:

$$V_{\text{пф}} = \frac{4\pi m r^3}{3V_{\text{общ}}} 100\%, \quad (11)$$

где $V_{\text{общ}}$ – общий объем изделия.

Основными параметрами, характеризующими вторую фазу в стереометрической структуре материала, являются размеры зерен (r) и их количество (m), которые зависят друг от друга, поскольку при постоянном объеме с увеличением размеров зерен уменьшается их количество и наоборот. Влияние этой зависимости на триботехнические и физико-механические свойства материала исследовалось экспериментально, результаты приведены на рис. 4. На кривых рис. 4а можно выделить три участка. На первом участке ($d_{\text{т.с}}=25...15$ мкм) наблюдается уменьшение износостойкости и коэффициентов трения. В связи с крупнозернистостью второй фазы на поверхностях трения не образуются целостные устойчивые вторичные структуры (рис. 4в). На втором участке ($d_{\text{т.с}}=15...8$ мкм) износ и коэффициент трения имеют минимальные значения, на поверхностях трения (рис. 4г) формируется устойчивая пленка. На третьем участке ($d_{\text{т.с}} < 8$ мкм) триботехнические (рис. 4а), а также физико-механические свойства (рис. 4б) заметно падают, ослабляется металлическая связь между матрицей и второй фазой. Вследствие этого снижается теплопроводность, а следовательно, возрастают коэффициент трения и износ. В этой

связи за оптимальный размер зерен второй фазы целесообразно принять $d_{\text{IIФ}}=15\ldots 8 \text{ мкм}$.

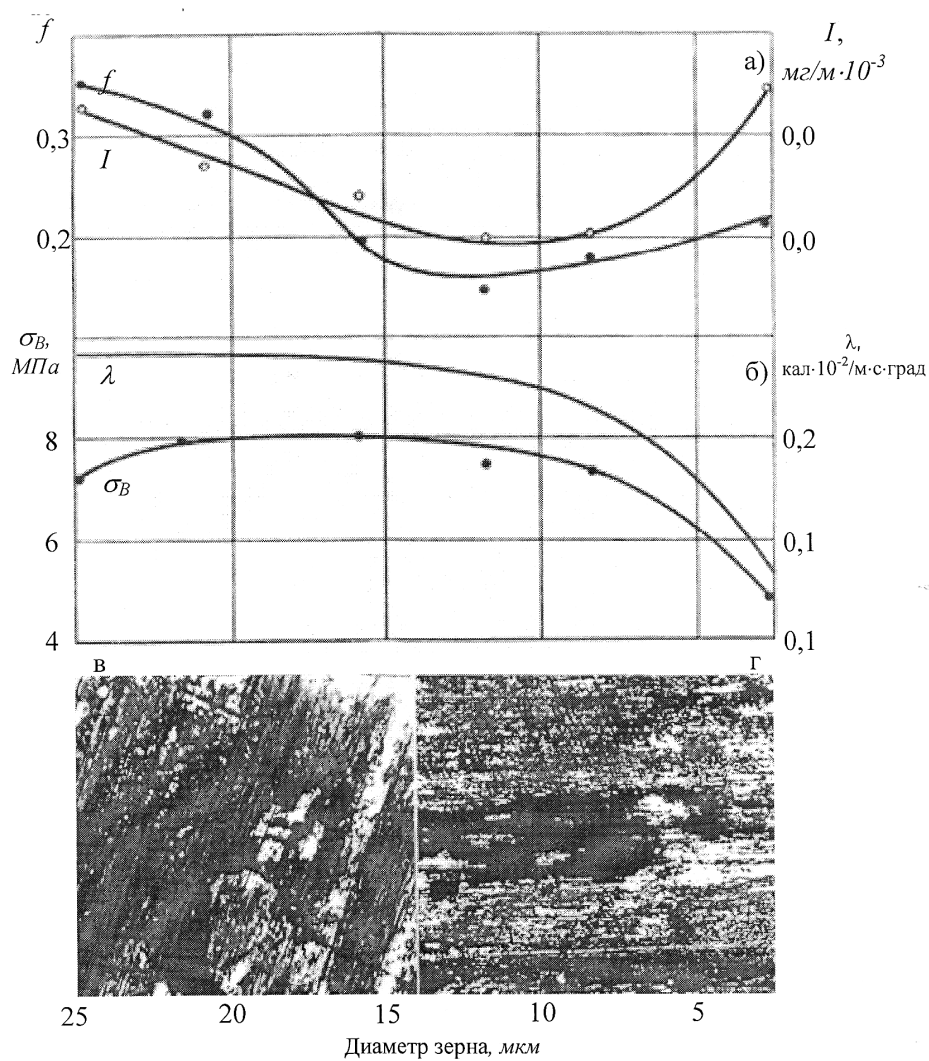


Рис. 4. Фрикционные и физико-механические свойства ИАПМ в зависимости от размеров зерен второй фазы (Fe-Mo-MoS_2 , $Q=1 \text{ МПа}$, $V=1 \text{ м/с}$, трение сухое)

Основная фаза (матрица) должна иметь высокую теплопроводность. В таком случае на участке трения не возникнут поля высокого температурного напряжения, чем и обеспечится долговечность работы узла трения. На рис. 5 показано влияние теплопроводности на выделение второй фазы и температурные напряжения на участке трения. При низкой теплопроводности температурные напряжения больше, следовательно, интенсивно происходит выделение второй фазы. Естественно, снижается долговечность узла трения. Высокие температуры препятствуют формированию вторичной структуры на трущихся поверхностях.

Как отмечалось, выбор объемного содержания фазы, оптимизация размеров зерна и равномерное их распределение обеспечивают нормальную работу структурной модели. Для дисперсно-упорядоченных материалов эти параметры теоретически и практически [7, 8] четко определены: $d < 0,1 \text{ мкм}$, $S = 2 \dots 5 \text{ мкм}$, $\alpha > 10\%$.

Как показали исследования, эти значения не могут быть оптимальными для материалов триботехнического назначения. Объем третьей фазы не должен превосходить 25% объема матрицы, обеспечивающего участие в работе каждого зерна [9]. При малых нагрузках объем третьей фазы не превышает 10%. Эффект ее действия значительно уменьшается. Поэтому в таких условиях целесообразно использовать материалы с двухфазной структурой.

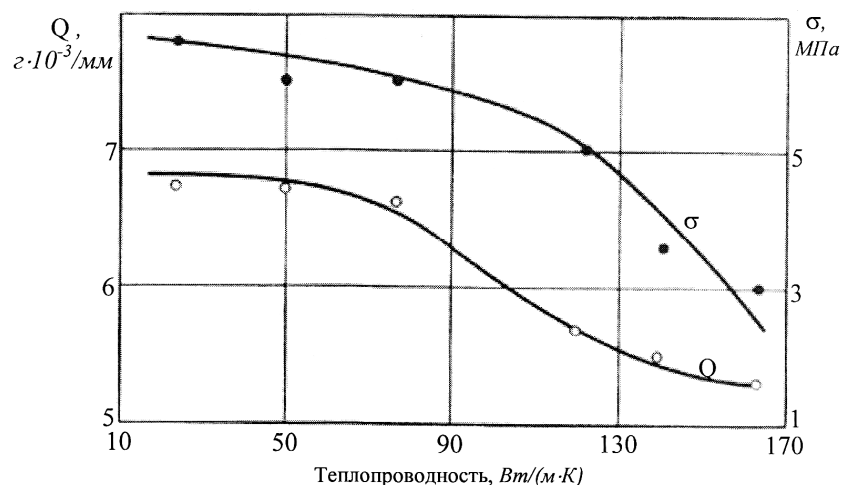


Рис. 5. Изменение выделяемого количества второй фазы и температурных напряжений в процессе трения в зависимости от теплопроводности ИАПМ (трение сухое, $Q=1 \text{ МПа}$, $V=1 \text{ м/с}$)

Влияние размеров частиц на триботехнические свойства материала показано на рис. 6. Как видим, оптимальные размеры частиц третьей фазы

колеблются в пределах 1,5...3,5 мкм. В этом интервале значения f и I минимальные.

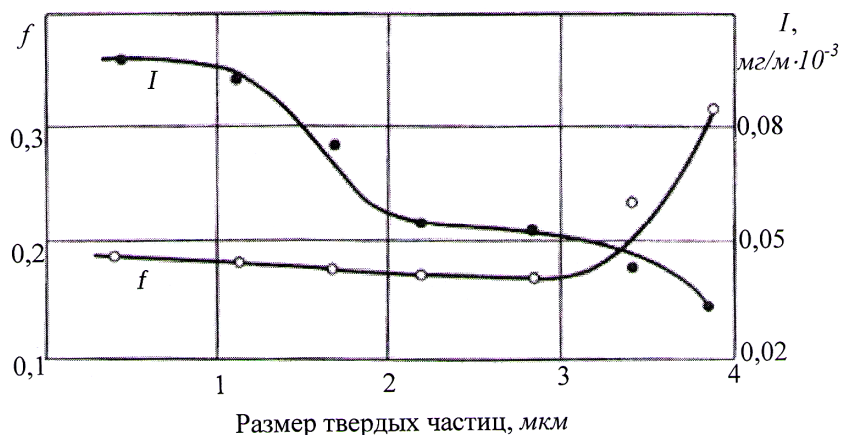


Рис. 6. Изменение фрикционных характеристик трехфазных ИАПМ в зависимости от размеров твердых включений (Fe-Mo-MoS₂, $Q=1 \text{ МПа}$, $V=1 \text{ м/с}$, трение сухое)

Среднюю удаленность частиц третьей фазы можно определить по формуле [10]

$$L = \frac{2R}{6,2 a / (1,5 a)^{1/3} - 1}, \quad (12)$$

по которой оценивается равномерность распределения третьей фазы. Оптимальное расстояние между частицами составляет 5...15 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юм-Розер В., Рейнор Г. Структура металлов и сплавов.-М.: Металлургиздат, 1959.-391 с.
2. Бокштейн С.З. Строение и свойства металлических сплавов.-М.: Металлургия, 1971.-495 с.
3. Уманский Я.С., Финкельштейн Б.Н., Блантер М.Е. Физические основы металловедения.-М.: Металлургиздат, 1949.-320 с.
4. Гуляев А.П., Лахтин Ю.М., Тарусин А.И. Термическая обработка стали.-М.: Машгиз, 1946.-218 с.
5. Карапетян Г.Х. Механизм образования вторичных структур в процессе трения и износа // Порошковая металлургия.-1988.-№ 7.- С. 92 – 96.
6. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения.-М.: Физматгиз, 1963.-476 с.
7. Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсноупрочненные материалы.-М.: Металлургия, 1974.-199 с.

8. Физическое металловедение / Под ред. Р.У. Кана, П.Т. Хаазена.-М.: Металлургия, 1987.-Т. 2.-624 с.
9. Демидов С.П. Теория упругости.-М.: Высшая школа, 1979.- 432 с.
10. Фридель Ж. Дислокации.-М.: Мир, 1967.-643 с.

ГИУА(П). Материал поступил в редакцию 10.07.2009.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Գ.Խ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ,
Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Հ. ԶԱԲԱՐՅԱՆ

ՄԱՇԱԿԱՅՈՒՆ ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՓՈՇԵՆՑՈՒԹԵՐԻ ՏԱՐԱԾԱԳՐԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԸ

Հակաշփական նշանակության մաշակայուն փոշեկույրերի համար հաստատված է փոխադարձ կապ կոնտակտային ճնշման, կրողունակության, մաշակայունության, շփման գործակցի և տարածագրական բնութագրերի ու ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների միջև: Որոշված է կառուցվածքային յուրաքանչյուր բաղադրիչի ազդեցությունը շփման գործակցի վրա, հիմնավորված են վերջինիս պարամետրերը:

Առանցքային բառեր. փոշի, հակաշփական նյութ, մաշակայունություն, շփման գործակից, ջերմահաղորդականություն, պինդ քսանյութ, ինտերմետաղական ֆազ, տարածաշափություն:

S.G. AGHBALYAN, G.X. KARAPETYAN, A.A. PETROSYAN,
A.S. AGHBALYAN, A.H. ZAKARYAN

STEREOMETRIC STRUCTURE OF THE WEARPROOF ANTIFRICTIONAL POWDER MATERIALS

The interrelation of the contact pressure, bearing ability, wear resistance and factor of friction from stereometric powder materials of antifrictional designation is established. The role of each structural component in the course of friction is defined and their parameters are grounded.

Keywords: powder, antifrictional material, durability, friction factor, heat conductivity, firm greasing, intermetallic phase, stereometry.