

С.Г. АГБАЛЯН, Г.Х. КАРАПЕТЯН, А.А. ПЕТРОСЯН,  
А.С. АГБАЛЯН

## МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

Определена роль каждой структурной составляющей в процессе трения и обоснованы их параметры: размеры частиц матрицы (первая фаза) –  $< 60$  мкм; твердой смазки (вторая фаза) –  $8...12$  мкм (объемное содержание  $10...15\%$ ); интерметаллидов (третья фаза) –  $0,5...2,0$  мкм (объемное содержание  $10...15\%$ ). Показано, что при оптимальном содержании твердой смазки образование вторичной структуры гарантируется при соотношении коэффициентов объемного расширения структурных составляющих  $KOPM > KOP_{т.с.}$ .

**Ключевые слова:** трение, матрица, твердая смазка, интерметаллидная фаза, вторичная структура, коэффициент объемного расширения.

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. Это объясняется тем, что пленка смазочного материала либо разрушается, либо выгорает. Кроме того, наблюдается фильтрация смазки через поры, что существенно снижает гидродинамическое давление в зоне трения и, тем самым, несущую способность материала. В местах контакта возникают также температурные зоны, которые вызывают локальное разупрочнение и разрушение. К этому следует добавить, что структурная пористость резко снижает теплопроводность, а сами поры, являясь концентраторами напряжений, вызывают ускоренный износ.

Согласно молекулярно-механической теории трения, внешнее трение осуществляется с минимальной работой в том случае, когда прочность адгезионной связи между контактируемыми поверхностями меньше прочности нижележащих поверхностных слоев, т.е. когда имеет место положительный градиент механических свойств по глубине. В этом случае вся деформация при трении будет

сосредотачиваться в тонком поверхностном слое, предотвращая его от катастрофического разрушения и глубинного вырывания. 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 в возможно большом диапазоне скоростей и нагрузок, в том числе и экстремальных.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является исследование механизма образования вторичных структур в процессе трения и износа.

Эксперименты проводились на материалах Fe – Mo – MoS<sub>2</sub>. Как показали исследования, поверхностная пленка формируется в процессе приработки (рис. 1). С формированием на поверхностях трения вторичных структур коэффициент трения снижается (рис. 2), а с образованием устойчивой пленки – стабилизируется (кривая 1).

Общая площадь (S) пленки представляет собой сумму поверхностей (S<sub>i</sub>) всех зерен (m) второй фазы, располагаемой на поверхности трения, т.е.

$$S = \sum_{i=1}^m S_i.$$

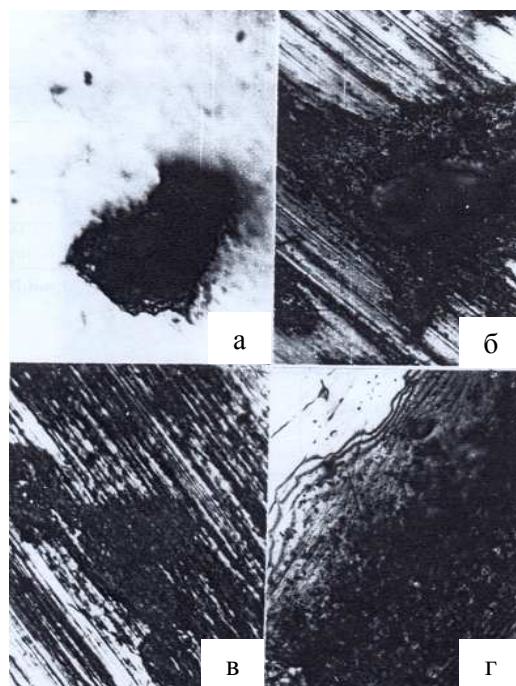


Рис.1. Металлография формирования вторичных структур на поверхностях трения (х400) (Fe-Mo-MoS<sub>2</sub>, P=1 МПа, V=1 м/с, трение сухое): а – до работы; б – 5 мин после работы; в – 10 мин после работы; г – 15 мин после работы

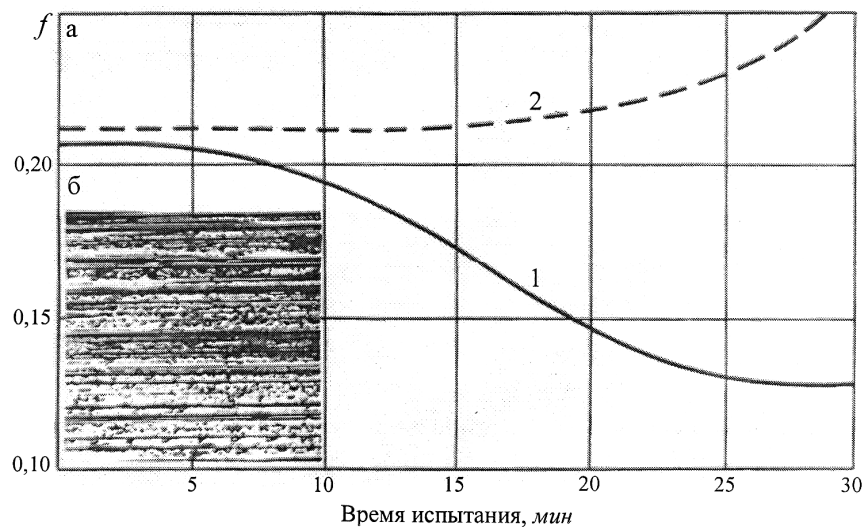


Рис. 2. Изменение коэффициента трения в зависимости от времени испытания (трение сухое,  $Q=1$  МПа,  $V=1$  м/с): 1- FeMo+MoS<sub>2</sub> (MoS<sub>2</sub>=20%); 2 – FeMo

Эта зависимость графически изображена на рис. 3. Последующие эксперименты подтверждают, что зерна второй фазы должны иметь оптимальные размеры, так как при чрезмерной мелкозернистости прочность пленки уменьшается, и наблюдается сильный износ (рис. 3).

Как видно из рис. 3, оптимальный размер зерен второй фазы колеблется в пределах 5...15 мкм. Вторичные структуры взаимодействуют с поверхностью основной фазы и образуют пленки толщиной до 0,05 мкм, обеспечивая тем самым работоспособность материала, так как при такой толщине пленки число ориентированных монослоев атомов может достигать нескольких десятков. Например, для графита – 70...80, для дисульфида молибдена – 30...40 и т.д. [1]. Прочность пленки оценивается поверхностным напряжением [2]:

$$\sigma = 5,64 \cdot 10^4 \cdot (\rho/A)^{4/3}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность металла;  $A$  – атомная масса.

Прочность пленки возрастает, если в веществе, образующем вторую фазу, есть элемент или элементы, размеры атомов которых ( $r_{\text{IIФ}}$ ) с атомами элементов основной фазы ( $r_0$ ) находятся в соотношении

$$r_{\text{IIФ}}/r_0 \leq 0,59.$$

Например, графит на поверхности молибдена образует более прочную пленку, чем на поверхности меди, так как в первом случае  $r_{\text{гр}}/r_{\text{Мо}} = 0,55$ , во втором –  $r_{\text{гр}}/r_{\text{Cu}} = 0,6$ .

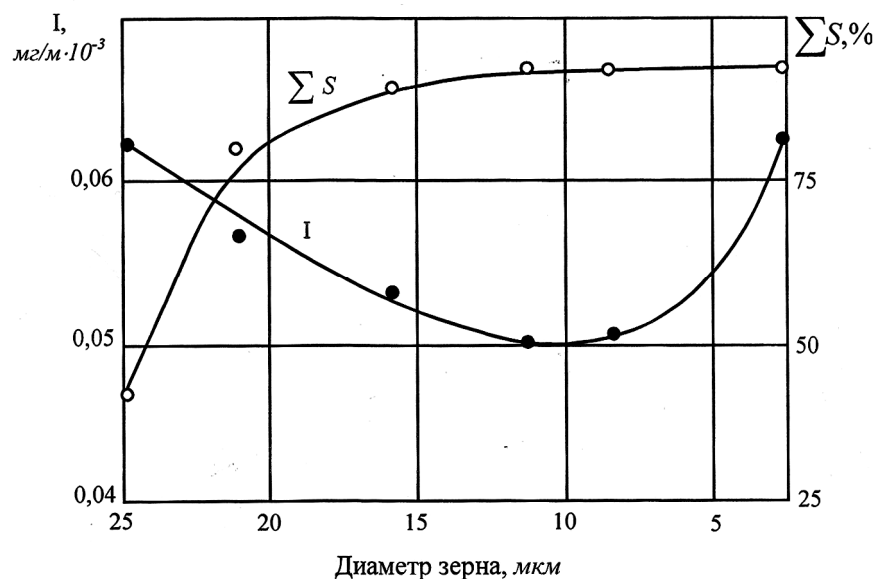


Рис. 3. Изменение износа (I) и суммарной поверхности вторичной структуры в зависимости от зернистости второй фазы (Fe-Mo-MoS<sub>2</sub>, Q=1 МПа, V=1 м/с, трение сухое)

Механизм образования поверхностных пленок обусловлен также внешними факторами (P, V), которые интенсифицируют износ (рис. 4). При малых нагрузках и скоростях скольжения время формирования пленки увеличивается. При больших нагрузках, превышающих предел упругости материала, основа материала подвергается пластической деформации, и пленка разрушается. Между трущимися поверхностями возникают межмолекулярные и межатомные силы, следовательно, активизируются диффузионные процессы, и материал теряет работоспособность.

Проведено исследование влияния фазового состава антифрикционных материалов на механизм образования вторичных структур (рис. 5). При малом содержании твердых смазывающих веществ (<15% об.) пленка формируется не по всей рабочей поверхности. Избыточное количество твердой смазки (>25% об.) оказывает отрицательное влияние, снижая физико-механические свойства износостойких антифрикционных порошковых материалов (ИАПМ), и может быть причислено к “продуктам износа”. Экспериментально установлено, что толщина пленки составляет 0,1...0,2 мкм.

Определенный интерес представляет химический состав вторичных структур. Однако выявить его имеющимися методами анализа (рентгенофазовый, микрорентгеноспектральный, электронно-графический и т.д.) нам не удалось ввиду малой толщины слоев. По этой причине проводились сравнительные исследования с образцами, в структуре которых отсутствовала вторая фаза (твердые смазывающие

вещества). Как видно из рис. 2, у этих материалов на поверхностях трения отсутствуют вторичные структуры; имеются риски, обусловленные диффузионными процессами, а не деформационными. Кривая 2 на рис. 2 подтверждает подобную точку зрения.

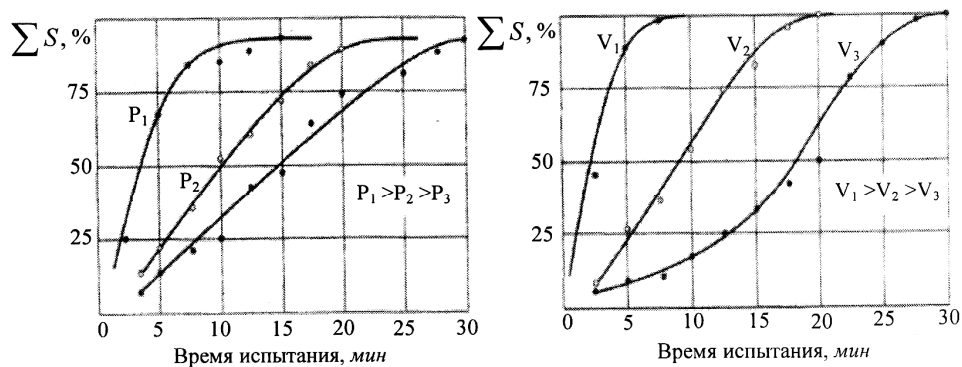


Рис. 4. Интенсивность образования поверхности вторичной структуры в зависимости от внешних факторов (трение сухое, материал Fe-Mo-MoS<sub>2</sub>): P<sub>1</sub>=1 МПа; P<sub>2</sub>=5 МПа; P<sub>3</sub>=10 МПа; V<sub>1</sub>=1 м/с; V<sub>2</sub>=4 м/с; V<sub>3</sub>=8 м/с

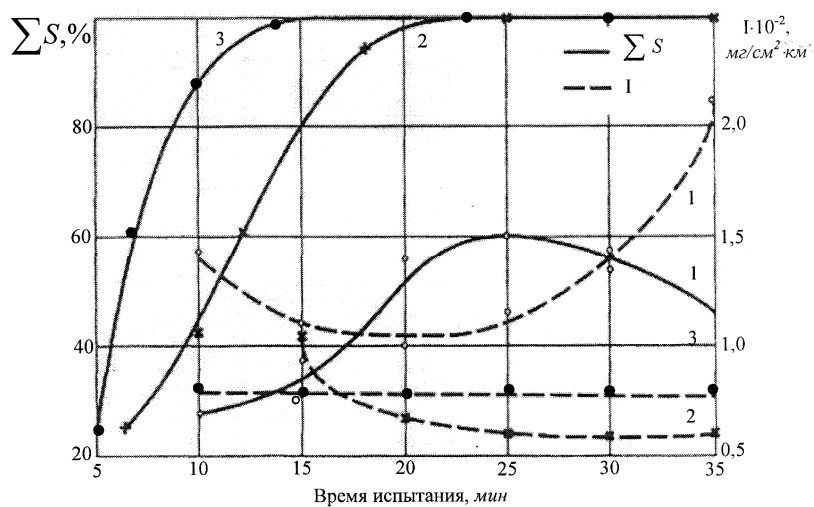


Рис.5. Влияние фазового состава на механизм образования вторичных структур материал FeMo+MoS<sub>2</sub>, Q=1 МПа, V=1 м/с, трение сухое): 1 – MoS<sub>2</sub>=10% объемн., 2 – MoS<sub>2</sub>=20% объемн., 3 – MoS<sub>2</sub>=30% объемн.

Проведены исследования по выявлению влияния кристаллической решетки второй фазы на формирование поверхностной пленки. В качестве второй фазы использовались Cu, Fe, Ti, Zn, C. Результаты представлены на рис. 6. Как видно из рисунка, у металлов с гексагональной решеткой коэффициент трения меньше. Кроме того, в зоне трения температура сравнительно низкая. Необходимо отметить, что  $f$  и  $t$  тем меньше, чем больше соотношение  $c/a$  (для  $\alpha$ -Ti  $c/a=1,59$ , для Zn – 1,85, для C – 2,73). Это объясняется тем, что в веществах с гексагональной решеткой скольжение между плоскостями кристаллов происходит по величинам малых сил (для Zn  $\rightarrow \tau_s = 90 \text{ Г/мм}^2$ , для Cu  $\rightarrow \tau_s = 200 \text{ Г/мм}^2$ ) [3].

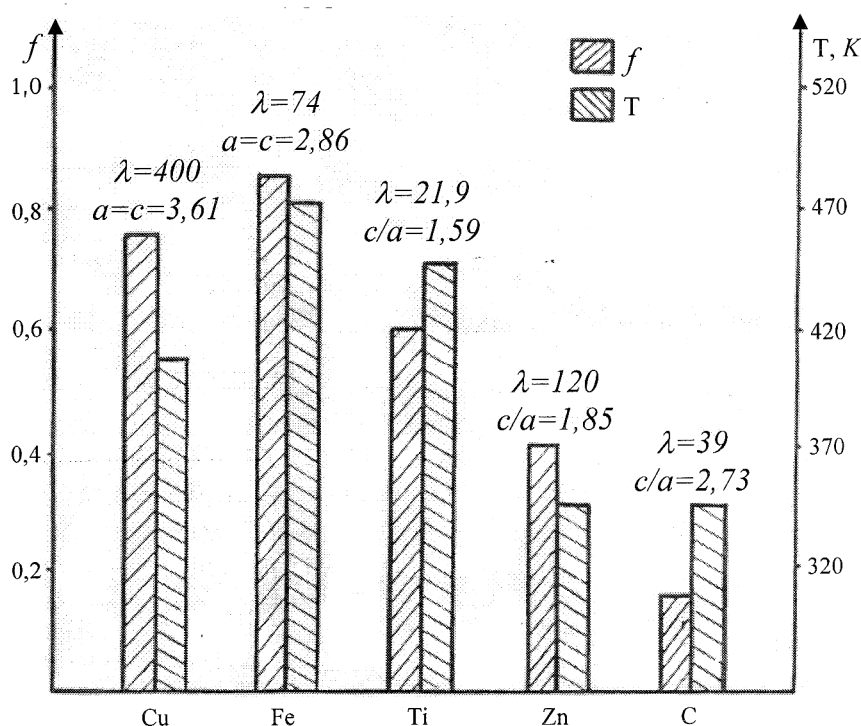


Рис. 6. Изменение коэффициента трения и температуры в зоне трения в зависимости от типа и параметров кристаллической решетки элементов

В трехфазных материалах механизм образования вторичных структур на поверхностях трения тот же, что и в двухфазных. Однако долговечность и работоспособность пленок на поверхностях трехфазных ИАПМ в два и более раза выше, чем на поверхностях двухфазных ИАПМ (рис. 7), что обеспечивается третьей фазой (твердыми частицами).

Под действием касательного напряжения дислокация, перемещаясь, встречает на своем пути препятствие. Дислокация под действием усилия  $T = Gb^2/2$ , где  $b$  - вектор Бюргера, прогибается между препятствиями.

Обозначим угол между прямолинейными отрезками дислокации по обе стороны от препятствия через  $\varphi$  ( $\varphi < \pi$ ). Сила, действующая на одно препятствие со стороны дислокации, как это видно из рис. 8, равна

$$F = 2T \cdot \sin \varphi / 2. \quad (2)$$

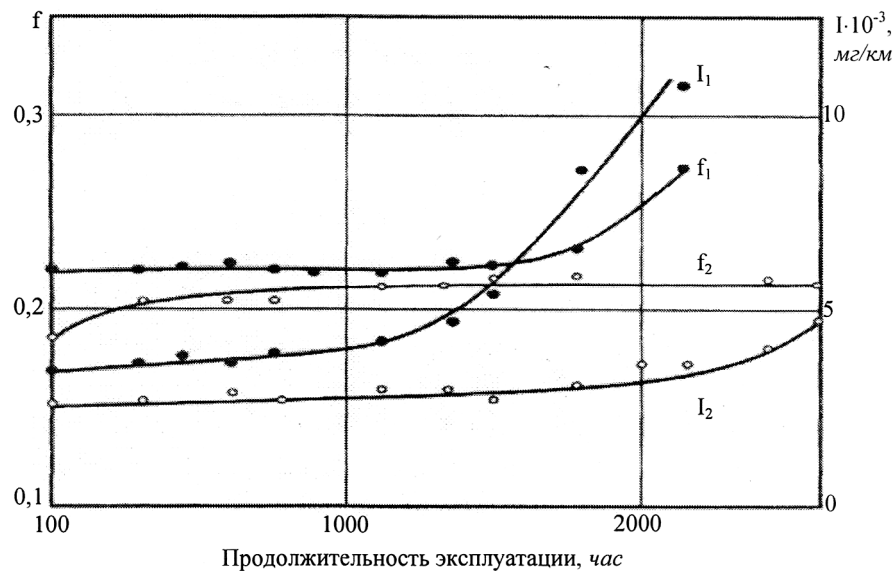


Рис. 7. Зависимость фрикционных свойств двухфазных и трехфазных ИАПМ от продолжительности эксплуатации: 1 - Fe-Mo-MoS<sub>2</sub> (I фаза – размер 45...55 мкм, объем 86...88%; II фаза – размер 10 мкм, объем 12...14%); 2 - Fe-Mo-MoS<sub>2</sub> (I фаза – размер 50...55 мкм, объем 65...78%; II фаза – размер 8 мкм, объем 12%; III фаза – размер 2 мкм, объем 10...25%)

Подставив в (2) значение  $T$ , получим силу сопротивления одной твердой частицы (третьей фазы) перемещению дислокации в пленке

$$F = G \cdot b^2 \cdot \sin \varphi / 2 \quad (3)$$

и напряжение, вызванное силой

$$\tau = \frac{G \cdot b}{\ell_0} \sin \varphi / 2, \quad (4)$$

где  $\ell_0$  – расстояние между твердыми частицами.

На поверхности  $S$  пленки напряжение, препятствующее скольжению, будет обусловлено количеством твердых частиц ( $n$ ):

$$\tau = \frac{n \cdot G \cdot b}{\ell_0} \sin \varphi / 2. \quad (5)$$

Если через  $n$  выразим часть твердых частиц в общей площади пленки ( $a$ ) и площади их поперечного сечения ( $\pi R^2$ ), то получим

$$\tau = \frac{a \cdot G \cdot b}{\pi \cdot R^2 \cdot \ell_0} \sin \varphi / 2. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет утверждать, что прочность сформированных на поверхности трения пленок можно увеличить за счет уменьшения зернистости третьей фазы и увеличения ее содержания.

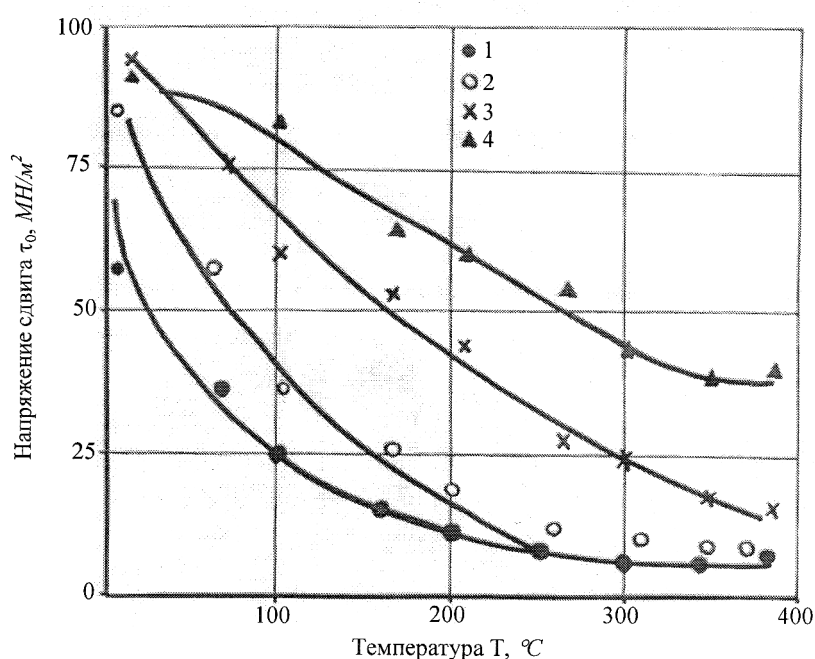


Рис. 8. Изменение напряжения сдвига в зависимости от температуры трения (материал FeMo,  $Q=0,5...5,0$  МПа,  $V = 2$  м/с): 1 – Mo = 5%; 2 – Mo = 10%; 3 – Mo = 15%; 4 – Mo = 25%

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брейтуэйт Е.Р.** Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия.-М.: Химия, 1967.-320 с.
2. **Семенченко В.К.** Поверхностные явления в металлах и сплавах.-М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957.-491 с.
3. Физическое металловедение / Под ред. **Р.У. Кана, П.Т. Хаазена.** Т.3: Физико-механические свойства металлов и сплавов: Пер. с англ.-М.: Металлургия, 1987.- 663 с.

ГИУА(П). Материал поступил в редакцию 10.10.2009.

**Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Գ.Խ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՅԱՆ**

**ՇՓՄԱՆ ԵՎ ՄԱՇՄԱՆ ԳՈՐԾՆԹԱՅՈՒՄ ԵՐԿՐՈՂԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԻ ԱՌԱՋԱՅՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄ**

Որոշվել է շփման ժամանակ կառուցվածքային յուրաքանչյուր բաղադրիչի դերը և հիմնավորվել են պարամետրերը, մասնավորապես՝ հատիկի մեծությունը: Այն մայրակի համար (առաջին ֆազ) պետք է լինի 60 մկմ-ից փոքր, պինդ քսանյութի համար (երկրորդ ֆազ)՝ 8...12 մկմ (ծավալային պարունակությունը՝ 10...15 %), իսկ ինտերմետաղական ֆազի համար (երրորդ ֆազ)՝ 0,5...2,0 մկմ (ծավալային պարունակությունը՝ 10...15 %): Ցույց է տրված, որ պինդ քսանյութի օպտիմալ քանակության դեպքում երկրորդային կառուցվածքի առաջացումը երաշխավորված է կառուցվածքային բաղադրիչների ծավալային ընդարձակման գործակիցների հետևյալ հարաբերությամբ.  $\alpha_{f.v} > \alpha_{f.v.p}$ :

**Առանցքային բառեր.** շփում, մայրակ, պինդ քսանյութ, ինտերմետաղական ֆազ, երկրորդային կառուցվածք, ծավալային ընդարձակման գործակից:

**S.G. AGHBALYAN, G.X. KARAPETYAN, A.A. PETROSYAN,  
A.S. AGHBALYAN**

## SECONDARY STRUCTURE FORMATION MECHANISM IN THE COURSE OF THE FRICTION AND DETERIORATION

The role of each structural component in the course of the friction is defined and their parameters are grounded: in particular the sizes of particles, matrices (the first phase) – <60 mkm; firm greasing (the second phase) – 8...12 mkm (the volume maintenance 10...15 %); intermetallics (the third phase) – 0,5...2,0 mkm (the volume maintenance 10...15 %). It is shown that with optimum firm greasing formation the content of the secondary structure is guaranteed by volume expansion coefficients of structural components  $F. of V.E.m > F. of V.E.$

f.g.

**Keywords:** friction, matrix, firm greasing, intermetallic phase, secondary structure, factor of volume expansion.