

<sup>1</sup>М. В. Киндрачук, д-р техн. наук, проф.,  
<sup>2</sup>А. В. Радионенко, канд. техн. наук,  
<sup>2</sup>В. В. Водзянский, канд. техн. наук, доц.,  
<sup>1</sup>С. В. Федорчук, асист.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С МИКРОКАНАВКАМИ

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет

<sup>2</sup>Приазовский государственный технический университет

*Исследована деформационная составляющая силы трения поверхностей с микроканавками. Влияние деформационной составляющей на трение оценивалось по времени микроприработки. Учитывалась глубина микроканалов и их относительная площадь. Исследования проводились на трибометре со схемой трения вал – гибкая стальная лента.*

**Введение.** У молекулярно-механической теории трения рассматривается механическая составляющая сила трения как усилие, необходимое для пропахивания поверхностного слоя твердого тела внедрившимися микронеровностями.

При трении поверхностей с микроканавками к этой составляющей добавляется другая составляющая, вызванная зацеплением вершин микронеровностей за кромки микроканалов, что вызывает при определенных условиях дополнительное возрастание силы и коэффициента трения (рис. 1).

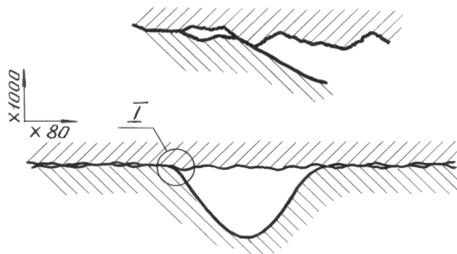


Рис. 1. Зацепление выступов микронеровностей за кромку микроканавки при трении скольжения

Микронеровности, проходящие над микроканавками в процессе трения, не испытывают сжатия под действием нагрузки и, следовательно, их высота больше высоты микронеровностей, находящихся в зоне контакта на участках между микроканавками.

Величина деформации микронеровностей может быть найдена, исходя из величины относительного сближения  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{R_{\max}},$$

где  $\delta$  – максимальная деформация микронеровностей;  $R_{\max}$  – максимальная высота микронеровностей.

Значение  $\varepsilon$  определяется расчетом и доказано, что не превышает 0,25 от  $R_{\max}$ . Таким образом, при максимальной высоте микронеровностей  $R_{\max} = 10$  мкм микронеровности будут ниже кромки микроканавки не более чем на 2,5 мкм. Учитывая, что кромка микроканавок не имеет острых краев, а незначительно завалена, то возникает предположение о несущественности величины деформационной составляющей, вызванной зацеплением за кромки микроканавок. Но имеются сведения, что после длительной работы пары трения скольжения с микроканавками на одной из рабочих поверхностей одна из кромок микроканавки становится более изношенной, чем противоположная (рис. 2).

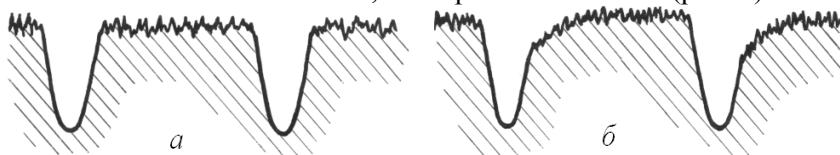


Рис. 2. Износ кромки микроканавки:  
а – до работы; б – после 1500 ч работы

**Методика исследований.** Для выявления роли деформационной составляющей было выполнено исследование приработки поверхностей с микроканавками.

Если происходит зацепление выступов микронеровностей за кромки микроканавок, то длительность микроприработки должна зависеть от количества микроканавок на единицу площади, т. е. от относительной площади микроканавок  $F_k$  при постоянной их ширине  $b_k$ . Эквивалентным фактором является количества выступов  $n$  на единицу площади.

С этой целью изучалась длительность микроприработки образцов с микроканавками и ленты контрообразцов в виде гибкой стальной ленты, на которой образовывали шероховатость  $R_z = 5...7$  мкм ( $R_a \approx 0,8$  мкм). Шероховатость на ленте образовывали шлифовальной шкуркой, причем следы шероховатости направляли перпендикулярно оси ленты.

Исследования проводили на трибометре [1] с использованием образцов из стали 45, HRC 28...32 и контрообразцов в виде стальной ленты У8 толщиной 0,06 мм.

Микроканавки на образцах выдавливались сферическим индентором радиусом  $r = 1,5$  мм. Расположены микроканавки параллельно образующей. Наплывы и вспучивание металла по краям микроуглублений тщательно удаляли так, чтобы завал кромок канавок был минимальным. Шероховатость несущей поверхности составляла  $R_z = 0,8...1,0$  мкм ( $R_a \approx 0,15$  мкм). Исследования проводились в режиме граничной смазки с маслом «Индустриальное-20» при скорости скольжения  $V = 3,14 \cdot 10^{-2}$  м/с. Контурное давление во всех опытах рассчитывали для поверхностей без учета площади микроканавок; оно составляло  $p_0 = 0,61$  МПа.

Длительность микроприработки определяли по времени до стабилизации значения коэффициента трения (рис. 3). В процессе микроприработки обеспечивали избыток смазочного масла, о чем свидетельствовало его наличие во входной зоне трения.

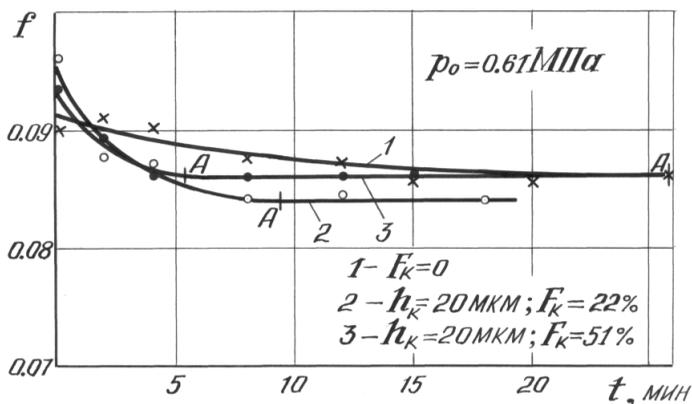


Рис. 3. Определение времени окончания микроприработки  $t_{пр}$  по стабилизации коэффициента трения  $f$  (точка  $A$ )

**Результаты исследований и их обсуждение.** Графики на рис. 4 подтверждают зависимость времени микроприработки от относительной площади микроканалов  $F_k$ , что позволяет сделать вывод зацеплении выступов микронеровностей о края микроканалов.

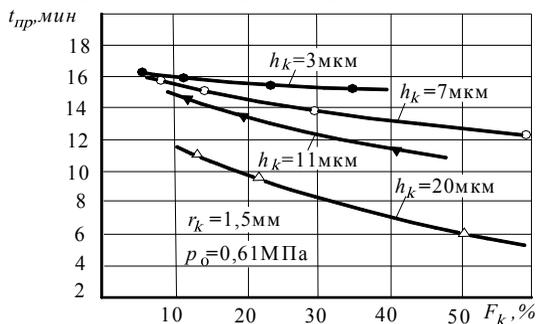


Рис. 4. Зависимость времени окончания микроприработки  $t_{пр}$  от относительной площади микроканалов  $F_k$

Следует отметить, что микроприработка в диапазоне  $h_k = 7...20$  мкм протекает более интенсивно, чем в диапазоне  $3...7$  мкм (рис. 5). Видимо, при малой глубине микроканалов величина деформационной составляющей силы трения на каждой канавке, связанная с зацеплением выступов микронеровностей за кромку, уменьшается за счет того, что смазочное масло из неглубоких каналов извлекается лучше и толщина смазочной пленки на кромках возрастает.

Значит, при глубине микроканалов  $h_k$  менее 3 мкм возможен переход к полужидкостной смазке при тех же значениях скорости скольжения, давления и вязкости смазочного материала, которые характерны для режима граничной смазки. Проконтролировать по характеру осциллограмм режим трения при  $h_k$  менее 3 мкм и  $F_k$  более 50% не удалось вследствие трудности технической подготовки образцов.

На скорость микроприработки, видимо, влияет и цикличность нагружений выступов микронеровностей при наличии микроканалов, что приводит к их усталостному разрушению. Чем больше относительная площадь микроканалов  $F_k$  при постоянной их ширине  $b_k$ , тем быстрее закончится микроприработка. При трении скольжения в режиме граничной смазки цикличность нагружения

микронеровностей может привести к более сильному износу поверхности трения, сопряженной с поверхностью, на которой образованы микроканавки. Но это компенсируется уменьшением износа, обусловленного возникновением и разрушением адгезионных мостиков сварки и, что особенно важно, устраняется вероятность схватывания.

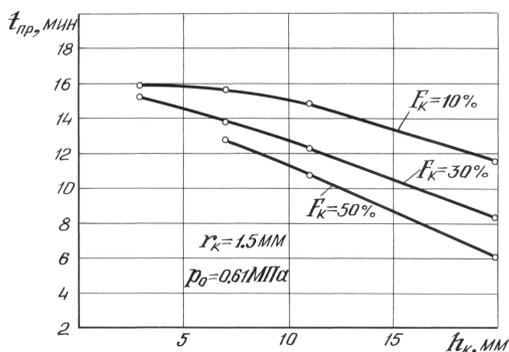


Рис. 5. Зависимость времени окончания микроприработки  $t_{пр}$  от глубины микроканавок  $h_k$

Усталостным характером изнашивания можно объяснить рост величины износа при нормальном трении в режиме граничной или полужидкостной смазки при увеличении относительной площади микроканавок  $F_k$ , когда она возрастает выше оптимального значения  $F_k = 25...45\%$ .

Значение деформационной составляющей силы трения должно возрастать при явлениях микросхватываний, так как в этих случаях разрыв адгезионных мостиков сварки сопровождается отрывом от поверхности трения микрочастиц металла, которые привариваются к выступам сопряженной поверхности. Это приводит к образованию более высоких выступов с высокой твердостью, которые зацепляются за края микроканавки и значительно деформируют их (рис. 6).

Уменьшение деформационной составляющей силы трения приводит к снижению энергозатрат на трение при установившемся режиме трения и улучшению плавности хода. Об улучшении плавности хода свидетельствовало уменьшение величины колебаний силы трения при снижении шероховатости ленты от  $R_z = 5...7$  мкм до  $R_z = 2...3$  мкм.

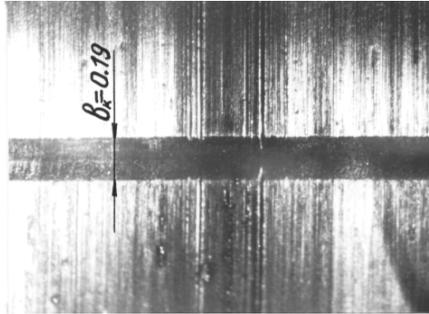


Рис. 6. Следы пропахивания кромки микроканавки выступами микронеровностей, образовавшихся в результате микросхватываний ( $h_k = 3$  мкм,  $r_k = 1,5$  мм)

В то же время для ускорения приработки необходимо увеличивать деформационную составляющую трения.

**Выводы.** Глубина микроканавок должна быть такой, чтобы на период приработки обеспечивать хорошую прирабатываемость поверхностей трения, в результате которой поверхности незначительно изнашиваются и глубина канавок уменьшается. Профиль канавок также изменяется, одна из кромок становится более скругленной. После окончания приработки канавки с меньшей глубиной и закругленные кромки микроканавок обеспечивают уменьшение адгезионной и деформационной составляющих силы трения и снижают износ трущихся поверхностей по сравнению с периодом приработки.

#### Список литературы

*Радионенко А.В.* Трибометр для исследования влияния качества поверхностей на состояние смазочной пленки//Машиноведение.–1987.–№6–С. 93–97.

*Кіндрачук М.В., Радіоненко О.В., Водзянський В.В., Федорчук С.В.* Дослідження деформаційної складової сили тертя поверхонь мікроканавками // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 53. – С.5–11.

Досліджено деформаційну складову сили тертя поверхонь мікроканавками. Вплив деформаційної складової на тертя оцінено за часом мікроприроблення. Враховувалася глибина мікроканавок і їх відносна площа. Дослідження проводилися на трибометрі за схемою тертя вал–гнучка сталевя стрічка.

Рис. 6, список літ.: 1 найм.

### **Investigations of the deformation constituent of the force of friction for the surfaces with microgrooves**

The deformation constituent of the force of friction for the surfaces with microgrooves has been investigated. The influence of the deformation constituent on friction was estimated depending on the time of microgrinding. The depth of microgrooves as well as their relative area was taken into account. The research was carried out on a tribometer according to the scheme of friction between a shaft and a flexible steel strip.

Стаття надійшла до редакції 04.06.10