

ЗМАЩУВАЛЬНА ДІЯ ТА ЗМАЩУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 621.891:531.43

А. М. Ковальченко, канд. техн. наук, старш. научн. сотруд.

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОСТИ КОНТРЕЛА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТРЕНИИ СО СМАЗКОЙ И ПЕРВОНАЧАЛЬНОМ ТОЧЕЧНОМ КОНТАКТИРОВАНИИ

Институт проблем материаловедения им. И. Францевича НАН Украины

Исследовано влияние твёрдости стального контртела на трибологическое поведение стальной текстурированной поверхности при трении со смазкой. Показано, что уменьшение твёрдости способствует переходу от режима граничного трения к смешанному при увеличении износа и площади контакта, что уменьшает коэффициент трения. Изменение происходит более интенсивно при повышенной плотности текстурирования и пониженной вязкости масла.

Введение. Текстурирование поверхности, то есть создание на поверхности искусственных неровностей или углублений служащих микро-гидродинамическими подшипниками, является одним из основных современных направлений улучшения трибологических характеристик [1]. Условием положительного влияния текстурирования есть соблюдение абсолютной параллельности сопряжённых поверхностей для обеспечения одинаковых условий гидродинамического течения смазки для каждого отдельного углубления. Несоблюдение параллельности приводит к разрушающему воздействию микронеровностей на сопряжённую поверхность ввиду абразивного действия и пластического оттеснения материала. В работе [2] было показано, что трение стального закалённого шарика при точечном контакте по текстурированной поверхности приводит к значительному износу (рис. 1, 2) по сравнению с необработанной поверхностью. При этом увеличение площади контакта ввиду износа ведёт к переходу от граничного режима трения к смешанному, что сопровождается падением коэффициента трения (рис. 3). Данный процесс происходит более интенсивно при большей плотности углублений, однако увеличение вязкости масла и скорости скольжения уменьшает величину износа. Однако в работе [2] не был рассмотрен вопрос влияния твердости на износ и соответствующее изменение режима трения.

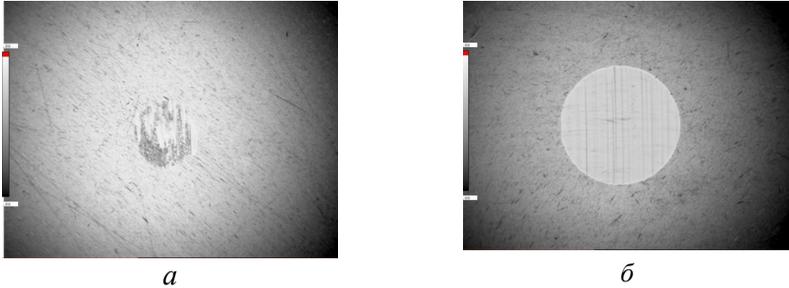


Рис. 1. Фотографии пятен износа на стальном шарике после трения по полированной (а) и текстурированной (б) поверхности [2]

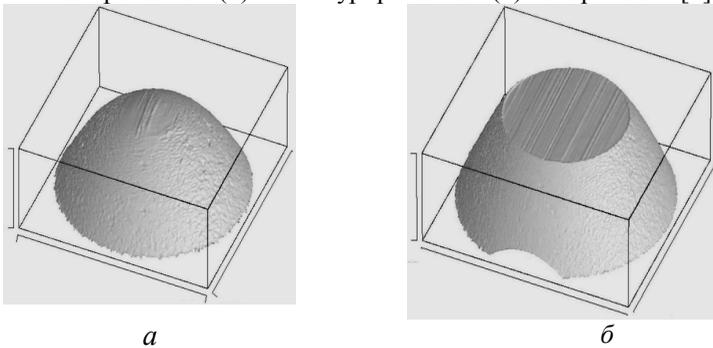


Рис. 2. Трёхмерные изображения пятен износа на стальном шарике после трения по полированной (а) и текстурированной (б) поверхности [2]

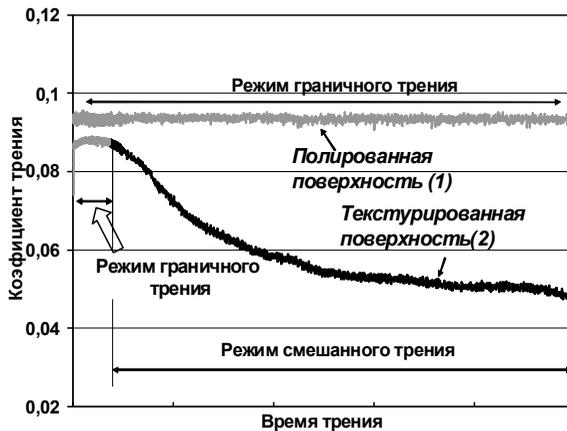
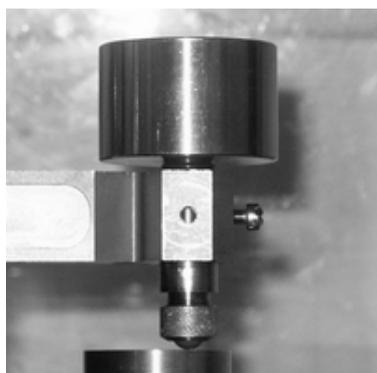


Рис. 3. Изменение коэффициента трения при скольжении стального шарика по полированной (1) и текстурированной стальной (2) поверхности [2]

Постановка задачи. Целью данной работы является определение влияния твердости стального контртела на его износ и коэффициент трения при различной скорости скольжении по текстурированной поверхности. Влияние плотности микронеровностей и вязкости масла также является предметом исследования.

Методика эксперимента. Трибологические испытания были проведены на серийной машине трения фирмы «CSM Instruments» по схеме контакта «образец-диск» (pin-on-disc) где стальной шарик диаметром 9,55 мм прижимался под действием весовой нагрузки в 10 и 20 Н к вращающемуся текстурированному диску диаметром 50 мм и высотой 10 мм. По периметру диска был закреплён бордюр из пластиковой ленты высотой 10 мм над рабочей поверхностью для наполнения маслом. Схема контакта и узел трения представлены на рис. 4, *а*, *б*. Твердость шарика из шарикоподшипниковой стали 52100 варьировалась в пределах от 12 до 60 HRC. Различная твердость была получена при различной температуре отпуска; от 200 до 800°C. Диски были изготовлены из стали Н-13 закаленной до твердости 60 HRC. Рабочая поверхность дисков была текстурирована импульсным лазером. Два типа поверхности были испытаны; со стандартными параметрами текстурирования и с более высокой плотностью углублений (рис. 5, *а*, *б* и табл. 1). Типичный вид отдельного углубления показан на рис. 6. Для смазки применялись 2 типа коммерческого полиальфаолефинового масла Mobil 1 с различной вязкостью (табл. 2).

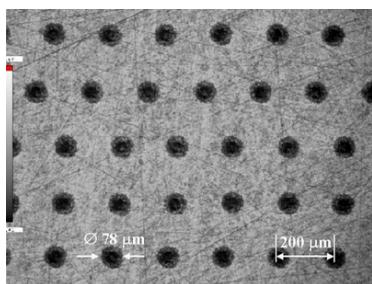


а

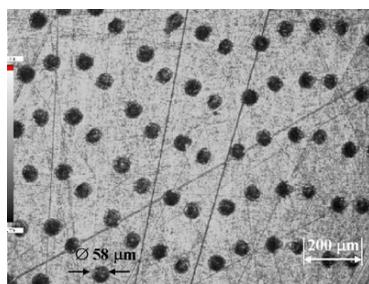


б

Рис. 4. Схема контактирования (*а*) и общий вид узла трения (*б*)



a



б

Рис. 5. Оптические изображения стандартной (а) и более высокоплотной (б) текстурированной поверхности (табл. 1)

Таблица 1

Параметры текстурирования поверхностей

Параметр	Диск 1. Стандартное текстурирование	Диск 2. Выскоплотное текстурирование
Глубина ямок, мкм	5,5	5
Шероховатость поверхности между ямками R_a , (мкм)	0,03	0,06
Диаметр ямки, мкм	78	58
Расстояние между углублениями, мкм	200	80–100
Плотность углублений (%)	12	15

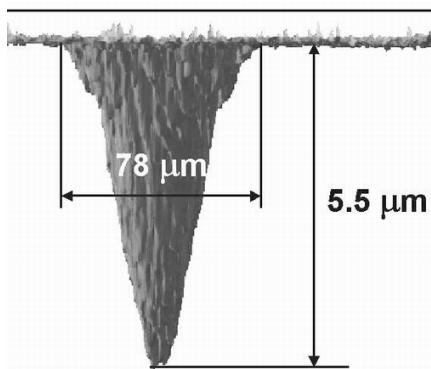


Рис. 6. Трёхмерное изображение единичного углубления (вид сбоку)

Таблица 2

Физические свойства использованных масел

Тип масла	Удельная плотность	Точка застывания (°C)	Точка воспламенения, (°C)	Кинематическая вязкость (сSt) при	
				40°C	100°C
5W-30	0,852	-54	232	54,8	10,1
15W-50	0,863	-45	255	124,7	17,7

Испытания были проведены при угловых скоростях от 10 до 200 об/мин для обеспечения различного режима трения. Соответственно, линейная скорость скольжения была в диапазоне от 0,015 до 0,3 м/с. Данный нагрузочно-скоростной диапазон покрывал граничный и смешанный режимы трения при увеличивающемся износе шарика. Износ шарика оценивался измерением диаметра пятна износа после трибоиспытаний на оптическом микроскопе. Следует отметить, что износ текстурированных дисков не обнаруживался. Режим трения, граничный либо смешанный, также определялся методом измерения переходного сопротивления между шариком и диском с помощью стандартного мультиметра [2; 3].

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Для получения сравнительных характеристик трибологического поведения использовался отпущенный при 650°C стальной шарик с твердость 20 HRC и закаленный с твердость 60 HRC. Первая серия экспериментов была проведена с дисками повышенной плотности текстурирования и при смазке более вязким маслом. Испытания были проведены при 10, 20 и 60 об/мин. Путь трения при всех скоростях был одинаковым, соответственно продолжительность испытаний равнялась 15, 8 и 3 часа. Данный подход был осуществлен, что бы полученные результаты износа соответствовали одинаковому пути трения для всех образцов. Данные замера коэффициентов трения и представлены на рис. 7, а-в. При малой скорости вращения (рис. 7, а) наблюдалось плавное равномерное падение коэффициентов трения и, ввиду неизменной постоянной абсолютной проводимости контакта, граничный режим трения. При скорости 20 об/мин (рис. 7, б) в первоначальный момент трения, когда фиксировалась абсолютная проводимость контакта, коэффициент трения интенсивно

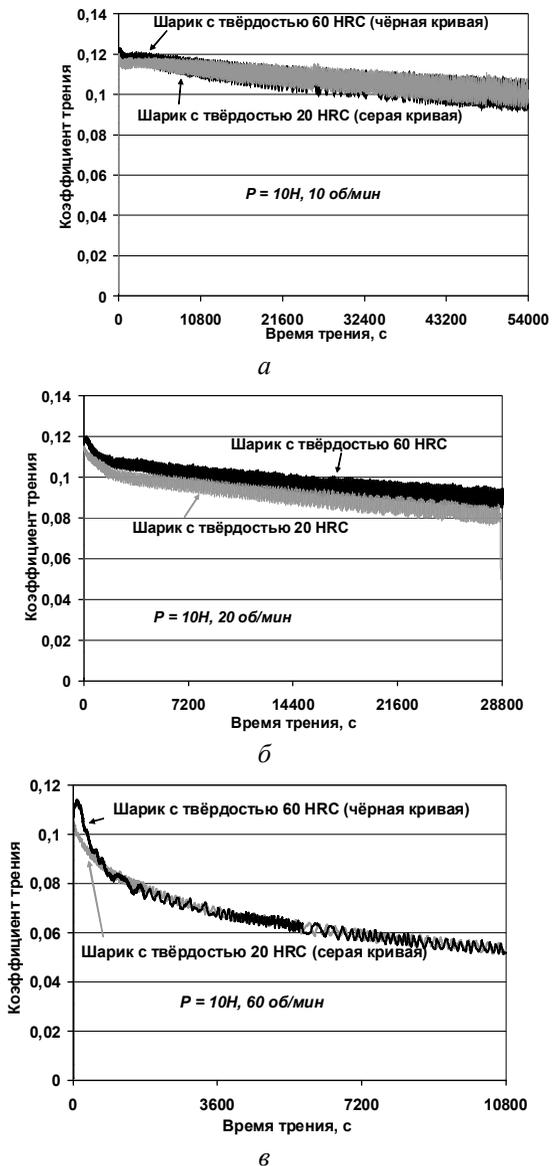


Рис. 7. Изменение коэффициентов трения закаленного и отпущенного шарика при скоростях вращения 10 (*a*), 20 (*б*) и 60 об/мин (*в*)

падал. Затем, когда коэффициент трения уменьшался стабильно, на основном этапе испытаний, и когда незначительное электрическое сопротивление контакта фиксировалось (0,01–0,03 Ом), можно сделать вывод, что произошёл переход от граничного к смешанному режиму трения. При 60 об/мин скорости вращения диска (рис. 7, в), переход от граничного трения к смешанному наступал в течение нескольких первых секунд, причем электрическое сопротивление колебалось в пределах от 0,1 до 0,25 Ом и у более мягкого шарика было незначительно выше, чем у закалённого. При 10 и 20 об/мин скоростях вращения, износ закалённого шарика превышал износ отпущенного шарика (рис. 8), однако при 60 об/мин результат был противоположным.

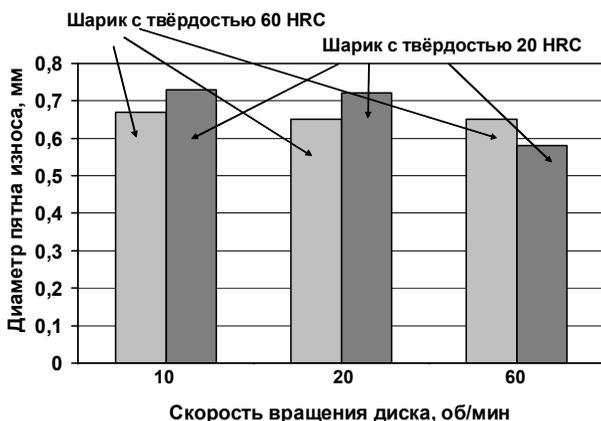


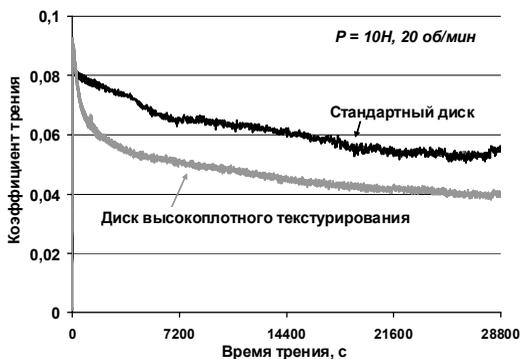
Рис. 8. Износ закаленного и отпущенного шарика при скоростях вращения 10, 20 и 60 об/мин

Данный факт может быть объяснён тем, что у отпущенного шарика произошел более быстрый переход к смешанному трению ввиду более интенсивного первоначального износа, и как результат, последующее уменьшение механического контактирования и износа. Примерно подобные результаты были получены при использовании стандартно-текстурированного диска, только величина износа шариков была меньше. Использование же менее вязкого масла и более высокой нагрузки (20 Н) приводило к более быстрому переходу от граничного трения к смешанному при увеличенном износе стальных шариков.

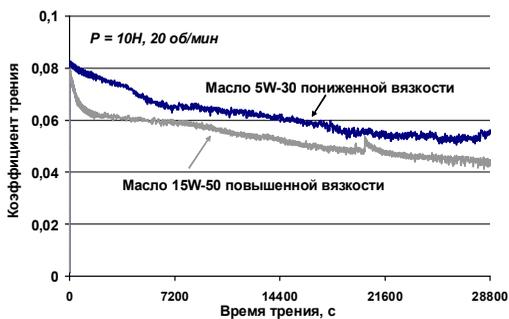
Падение коэффициента трения при скольжении отпущенного шарика по двум типам дисков показано на рис. 9, *а*; диск высокоплотного текстурирования более эффективно влияет на снижение коэффициента трения. Влияние типа масла на падение коэффициента трения представлено на рис. 9, *б*; увеличение вязкости также способствует снижению коэффициента трения. И как видно из рис. 9, *в*, прирабатывание отпущенного шарика происходит значительно быстрее, чем закалённого; в результате итоговый износ отпущенного шарика был меньше, чем закалённого, соответствующий диаметр пятна износа был 0,67 мм против 0,75 мм.

Следящая серия экспериментов имела целью исследовать динамику перехода режима трения в зависимости от скорости скольжения при наиболее жестком режиме нагружения; трении по диску высокой плотности текстурирования, нагрузке 20 *N* и смазывании маслом повышенной вязкости. Испытания были проведены при 15, 75, 100, 150 и 200 об/мин скоростях вращения.

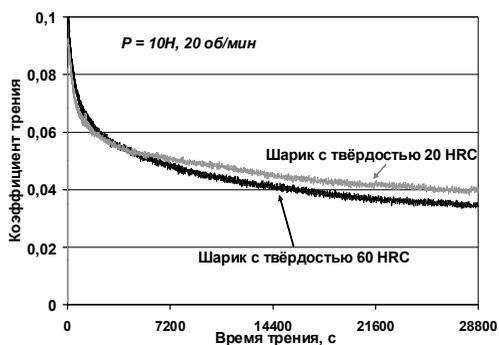
Путь трения во всех экспериментах был постоянным и составлял 540 м для корректного сравнения величины износа шариков. Соответственно время трения составляло 400, 80, 40, и 30 минут. Измерение электрического сопротивления во время трения показало только граничный режим трения у закалённого шарика и незначительное проявление смешанного режима для отпущенного шарика при минимальной скорости вращения. При скоростях вращения 75, 100, 150 об/мин наблюдался типичный переход от граничного трения в начале скольжения к смешанному с увеличением продолжительности трения для обоих шариков. При максимальной скорости скольжения было детектировано только граничное трение для закаленного шарика и смешанное трение для отпущенного. Как видно из рис. 10 и 11, более твердые шарики (рис. 10) характеризуются значительным возрастанием коэффициентов трения при всех скоростях в первоначальный период приработки и их по следующим плавным падением. Отпущенные же шарики прирабатывались очень быстро и показали стабильное уменьшение коэффициентов трения при примерно одинаковом их значении (рис. 11). Для обоих типов шариков характерным является более низкое значение коэффициентов трения при 200 об/мин. Величина пятна износа шариков уменьшалась с увеличением скорости вращения за исключением максимальной скорости, где износ стал выше, как видно из рис. 12.



a



б



в

Рис. 9. Падение коэффициента трения при скольжении отпущенного стального шарика по двум типам дисков и смазывании маловязким маслом (*a*), при скольжении по стандартному диску и смазке различными маслами (*б*), и при скольжении двух типов шариков по диску высокой плотности текстурирования и смазывании маловязким маслом (*в*)



Рис. 10. Изменение коэффициентов трения закалённых шариков при различных скоростях

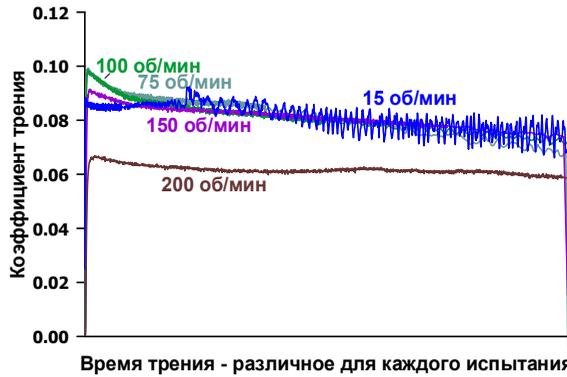


Рис. 11. Изменение коэффициентов трения отпущенных шариков при различных скоростях

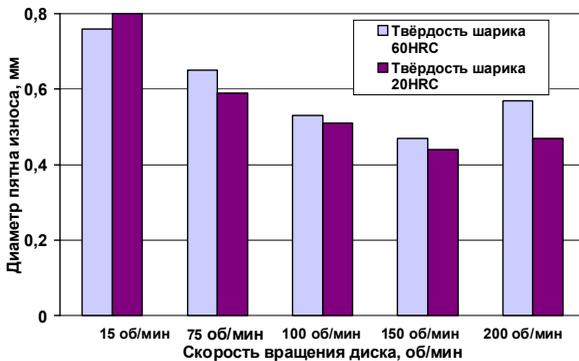


Рис. 12. Износ шариков различной твердости в зависимости от скорости

Дело в том, что при данной скорости наблюдалось удаление смазки из зоны контакта под действием центробежной силы. Следовательно, механическое взаимодействие между трущимися поверхностями возрастало, что подтверждено замерами электрического сопротивления. Износ отпущенных шариков был меньше чем у закаленных шариков при всех скоростях кроме минимальной. Это подтверждает результаты предыдущих опытов, что переход от граничного трения к смешанному наступает быстрее у более мягких шариков.

Завершающая группа экспериментов была проведена с целью определения динамики износа стальных шариков в зависимости от их твердости при жестком граничном трении, которое обеспечивалось минимальной скоростью вращения диска (15 об/мин), нагрузкой в 20 Н и смазкой высоковязким маслом при трении по диску повышенной плотности текстурирования. Разная твердость стальных шариков достигалась их отпуском при различных температурах. Падение твердости шариков с увеличением температуры отпуска изображено на рис. 13. Износ шариков контролировался во время трения; машина трения останавливалась, измерялось пятно износа, после образец держатель устанавливался в том же положении и трение возобновлялось.

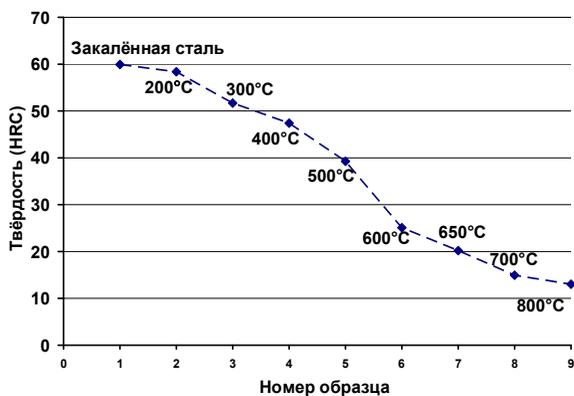


Рис. 13. Падение твердости шариков с увеличением температуры отпуска.

Средние значения трёх измерений износа шариков представлены на рис. 14. Как видно из рисунка, износ закаленных шариков был минимальным до, примерно, 10-й минуты скольжения, затем износ шариков с твердостью 48–48 HRC стал изменяться более

медленно и плавно, а после 25-и минут трения износ шариков с твердостью 20–40 HRC так же был меньше чем у самых твёрдых шариков. Однако износ самых мягких шариков с твёрдостью 12–15 HRC, отпущенных при температурах 700–800°C, был наиболее высоким. Характерной особенностью является то, что динамика износа всех отпущенных шариков представляет параллельные линии (рис. 14), в отличие от более резкого возрастания износа у шарика с твердостью 60 HRC. Данную зависимость, вероятнее всего, можно объяснить более интенсивным наклёпом и увеличением твёрдости трущейся поверхности у шариков с меньшей твердостью, и как результат, их лучшей прирабатываемостью. Изменение структуры исходного закалённого шарика, скорее всего, было минимальным.

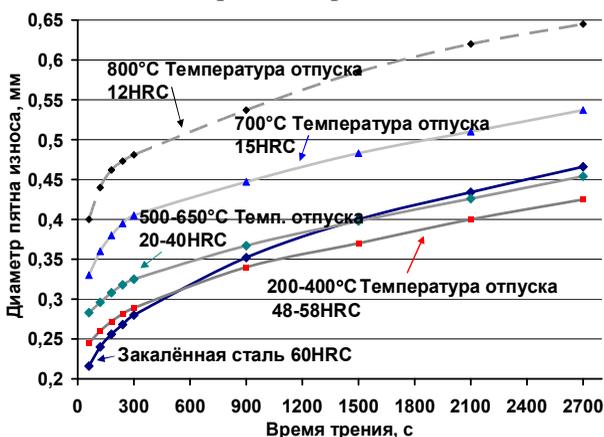


Рис. 14. Износ стальных шариков в зависимости от твёрдости при граничном трении по высокоплотной текстурированной поверхности

Выводы. В общем случае уменьшение твердости контртела при первоначальном концентрированном контакте способствует более интенсивному переходу от граничного режима к смешанному виду более интенсивного первоначального износа и уменьшения удельного давления. Этот процесс интенсифицируется при большей плотности текстурирования и при уменьшении вязкости масла. В результате более быстрого перехода к смешанному режиму, итоговый износ, в большинстве случаев, бывает меньше у контртел с пониженной твёрдостью, однако надо брать во внимание все параметры трибосистемы.

Рассмотренное явление может эффективно применяться на практике для снижения потерь на трение и уменьшения износа, когда небольшое первоначальное изменение трибосочленения допустимо, например как в торцевых уплотнениях или муфтах сцепления.

Список литературы

1. *Kovalchenko A.M.* State of investigations of surface texturing for tribological characteristics improvement of the friction units (a review) // Проблеми тертя та зношення. Наук.-техн. зб. – К.: НАУ. – 2011. – Вип.55. – С.13-26.

2. *Kovalchenko A., Ajayi O., Erdemir A., Fenske G.* Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact // Wear. – 2011 – Vol. 271, – № 9–10 – С. 1719–1725.

3. *Kovalchenko A., Ajayi O., Erdemir A., Fenske G., Etsion I.* The effect of laser texturing of steel surfaces and speed-load parameters on the transition of lubrication regime from boundary to hydrodynamic // Tribology Transactions. – 2004. – Vol. 47, – № 2 – С.299–307.

***Ковальченко А.М.* Вплив твердості контртіла на трибологічну поведінку текстурованої поверхні при терті зі змащуванням і початковому точковому контакті // Проблеми тертя та зношування. Наук.-техн. зб. – К.: НАУ. – 2011. – Вип.56. – С.272–284.**

Досліджено вплив твердості сталюого контртіла на трибологічну поведінку сталюого текстурованої поверхні при терті зі змазкою. Показано, що зменшення твердості сприяє переходу від режиму граничного тертя до змішаного при збільшенні зносу і площини контактування, що зменшує коефіцієнт тертя. Зміна відбувається більш інтенсивно при підвищеній щільності текстуровання і нижчій в'язкості масла.

Рис. 14, табл. 2, список літ. 3 найм.

***Kovalchenko A.M.* The influence of hardness of the steel counterbody on tribological behavior of the steel textured surface during friction with lubrication at initial point contact**

Influence of hardness of the steel counterbody on tribological behavior of the steel textured surface during friction with lubrication was investigated. It was shown that a decrease of the hardness promotes a transition from the boundary friction regime to the mixed regime at wear increasing and the area of contact decreasing that reduces the coefficient of friction. The change occurs more intensively at the increased density of the texturing and the decreased oil viscosity.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2011