

УДК 621.891

М. В. КИНДРАЧУК¹, А. В. РАДИОНЕНКО², В. М. КИНДРАЧУК³

¹Национальный авиационный университет, Украина

²Приазовский государственный технический университет, Украина

³Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ С ЧАСТИЧНО РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ

Изложена методика экспериментов и приведены результаты исследования скорости растекания смазочного масла на поверхностях трения с частично регулярным микрорельефом. Описаны технологический способ образования на поверхности трения частично регулярного микрорельефа (ЧРМР) и способ контроля смачиваемости поверхностей.

Ключевые слова: смачиваемость поверхностей трения, частично регулярный микрорельеф, скорость растекания смазочного масла.

Вступление. Смачиваемость поверхностей, растекание и адсорбция смазочного масла изучались Дерягиным Б. В., Ахматовым А. С., Зимоном А. Д., Фуксом Г. И., Щедровым В. С., Матвеевским Р. М., Ребиндером П. А. и др.

По результатам исследований этих авторов можно сделать обобщение:

1. Смачиваемость, адсорбция и растекание смазочного масла прямо зависят от свободной поверхностной энергии твердого тела, которая повышается с развитием несовершенств кристаллического строения при пластической деформации.

2. Существенное влияние на смачивание и адсорбцию оказывает шероховатость поверхностей. Имеются данные, что наилучшая смачиваемость поверхностей наблюдается при оптимальной шероховатости, находящейся в пределах параметра шероховатости $R_a = 0,1 - 0,4$ мкм. Параметры микрогеометрии и их соотношение также могут влиять на смачиваемость поверхностей трения.

3. Растекание смазочного масла на гидрофильной поверхности происходит лучше в более узких каналах или каналах с большим радиусом и меньшей глубиной.

4. Пористость поверхностей оказывает положительное влияние на смачивание.

5. После приработки поверхностей трения смачиваемость улучшается и устанавливается динамическое равновесие между свободной поверхностной энергией и состоянием смазочной пленки.

6. Смачиваемость поверхностей трения может служить критерием окончания приработки.

7. Непосредственное влияние смачиваемости на процесс приработки и характеристики трения изучено недостаточно. Мало работ по исследованию влияния поверхностного пластического деформирования (ППД) на смачиваемость поверхностей смазочными веществами. Не исследовано влияние субмикрорельефа на смачивание и адсорбцию. Методы измерения смачиваемости поверхностей несовершенны.

8. Скорость самовосстановления смазочной пленки при ее разрыве можно регулировать за счет смачиваемости, которой можно управлять с помощью методов ППД и параметров микрогеометрии.

9. При финишной обработке поверхностей трения следует стремиться к обеспечению условий наилучшего смачивания поверхностей за счет создания оптимального наклепа и оптимальной шероховатости. Оптимальные наклеп и шероховатость могут быть получены методами ППД, не вызывающими температурного разупрочнения поверхностного слоя глубиной до 1 мкм. К таким мето-

дам можно отнести алмазное выглаживание, выглаживание шарами диаметром до 2 – 3 мм, накатывание профильными роликами и искусственная приработка поверхностей трения.

Постановка задачи. Для создания маслостойких поверхностей разработано большое число методов, одним из которых является вибронакатывание [1].

Вибронакатывание – образование на поверхности трения сетки микроканавок с помощью сферического индентора методом поверхностного пластического деформирования (ППД). Такие поверхности трения получили название «поверхности с частично регулярным микрорельефом (ЧРМР)».

Механизм граничной смазки поверхностей с ЧРМР не изучен для полного понимания процессов трения. Не выявлена роль смачиваемости поверхностей с ЧРМР в процессе трения.

Ранее выполнявшиеся исследования трения и смазки поверхностей с ЧРМР проводились без четкого разграничения режимов трения на граничное или полужидкостное. Отсутствуют рекомендации по наиболее эффективному применению поверхностей с ЧРМР в промышленности при граничном трении.

Предположительно, одним из механизмов смазочного действия при граничной смазке поверхностей трения с искусственно созданными микроканавками, является растекание смазки и ее самовосстановление. Растекание и самовосстановление обусловлены силами поверхностного натяжения, которые создаются энергетическим силовым полем поверхности трения и смазочного вещества. Этот вопрос глубоко изучался применительно к свободным поверхностям различных твердых материалов и различным жидкостям. Влияние поверхностной энергии на растекание смазочного масла, на самовосстановление граничной смазочной пленки, смачиваемость и адсорбцию на поверхностях трения с ЧРМР изучено недостаточно. Не выявлена роль смачиваемости поверхностей трения в процессе приработки этих поверхностей.

Целью данной работы является выявление роли смачиваемости поверхностей трения с ЧРМР смазочным маслом в механизме граничной смазки.

Способ контроля смачиваемости. Для контроля смачиваемости цилиндрических поверхностей с ЧРМР разработан способ [2], позволяющий исключить влияние погрешностей формы и волнистости исследуемого образца.

Способ заключается в следующем: на исследуемую поверхность цилиндрического образца 1 (рис. 1) накладывается матовая лавсановая пленка 2 толщиной 0,1 мм. Один конец пленки закрепляется, а второй подтягивается с постоянным усилием Q . В центре пленки имеется отверстие диаметром 0,5...1 мм от оси которого на внешней поверхности пленки нанесена равномерная сетка. На поверхность пленки в точке расположения отверстия наносится дозированная капля смазочного масла 3 и засекается время.

Смазочное масло проникает через отверстие в зазор, образованный выступами микронеровностей шероховатости образца и пленки и засасывается туда капиллярными силами поверхностного натяжения. За счет соприкосновения пленки с маслом на ней отчетливо проступает темное пятно, свидетельствующее о площади растекания смазочного масла в зазоре между поверхностью образца и пленкой за время $t_{расм}$. По скорости растекания судят о смачиваемости исследуемой поверхности.

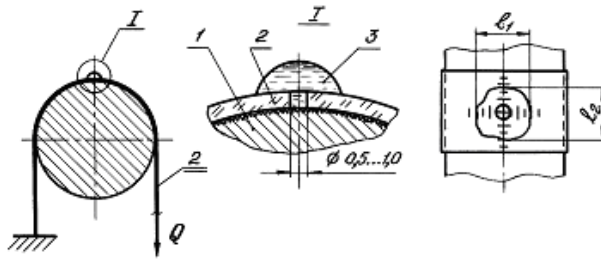


Рис. 1. Способ контроля смачиваемости цилиндрических поверхностей:
1 – образец; 2 – лавсановая матовая плёнка; 3 – капля смазочного масла

Следует учитывать, что метод является относительным. Исследуемая поверхность образует зазор с пленкой, а не с сопряженной поверхностью детали в паре трения. Шероховатость пленки и величина ее поверхностной энергии отличаются от их значений на сопряженной поверхности в паре трения. Поэтому можно судить лишь об изменении смачиваемости относительно поверхности пленки при исследовании различных поверхностей образцов. При этом необходимо обеспечивать постоянство величины поверхностной энергии пленки, т. е. следить за неизменностью ее шероховатости и степени загрязнения адсорбированными пленками.

Способность поверхности к смачиваемости определяется по скорости растекания смазочного масла. Важным является то, что можно контролировать скорость растекания в разных направлениях: вдоль образующей образца или перпендикулярно к ней.

Скорость растекания смазочного масла под пленкой высокая, поэтому для четкой фиксации отрезков времени и размеров площади растекания масла была применена киносъемка с частотой 12 кадров в секунду. Киносъемка производилась кинокамерой «Киев-16У» на негативную киноплёнку КН-2.

Поскольку частота кадров в кинокамере величина постоянная, то по номеру кадра на киноплёнке можно определить отрезок времени от начала растекания масла под пленкой и размеры пятна растекания. Момент начала растекания хорошо фиксировался на киноплёнке по моменту отрыва капли масла от конца иглы медицинского шприца.

На рис. 2 показаны зависимости размеров пятна масла под пленкой l_1 и l_2 от времени растекания $t_{расст}$ и от номера кинокадра, а на рис. 3 кинограмма растекания масла. Скорость растекания находится по формуле, как половина размера пятна масла под пленкой l_1 или l_2 в единицу времени (рис. 2).

Исследование влияния геометрических параметров ЧРМР на скорость растекания смазочного масла. Известно, что на величину угла смачивания и, следовательно, на скорость растекания значительно влияет степень очистки поверхности от адсорбированных пленок, причем, чем чище поверхность, тем это влияние заметнее. При наличии на поверхности твердого тела адсорбированных пленок величина свободной поверхностной энергии, обусловленная атомомолекулярным состоянием поверхности, ослабевает значительно сильнее, чем величина поверхностной энергии, связанная с шероховатостью поверхности. Поэтому в данном эксперименте при контроле смачиваемости поверхности не добивались высокой степени очистки поверхности, а стремились лишь к получению на исследуемых поверхностях пленок одинаковой толщины.

Для этого выполнялась следующая подготовка поверхности: двукратная очистка бензином, ацетоном и повторная обработка очищенным бензином. Затем на поверхность наносилась дозированная капля очищенного бензина, в котором бы-

ло растворено 20 % масла Индустриальное–20. Эта капля разносилась по поверхности образца на постоянной площади. После высыхания бензина на поверхности оставалась равномерная тонкая пленка масла. Аналогично подготавливалась и лавсановая пленка.

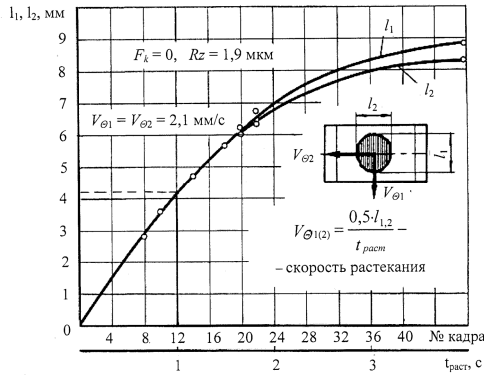


Рис. 2. Пример определения скорости растекания смазочного масла V_{θ} под плёнкой

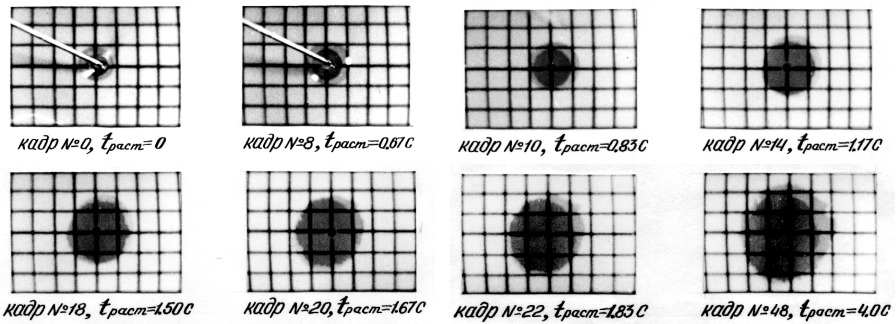


Рис. 3. Кинограмма растекания смазочного масла под лавсановой плёнкой при текущем времени $t_{\text{расст}}$

Перед изучением влияния площади микроканавок поверхностей с ЧРМР на скорость растекания масла был поставлен эксперимент, позволивший сравнить влияние шероховатости поверхности на величину краевого угла смачивания θ и на скорость растекания V_{θ} .

Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 30 мм. Материал образцов Сталь 45 с первоначальной твердостью HRC 28-30.

Обработка образцов включала тонкое шлифование с последующей доводкой притирами с целью снижения погрешностей формы и волнистости.

Величина угла смачивания θ на образцах без микроуглублений фиксировалась на фотопленке при фотографировании капли масла Индустриальное–20, нанесенной на поверхность, через две секунды после отрыва ее от конца иглы шприца. Фотосъемка производилась при контросвещении, что позволяло получать четкий силуэт капли масла на поверхности (рис. 4).

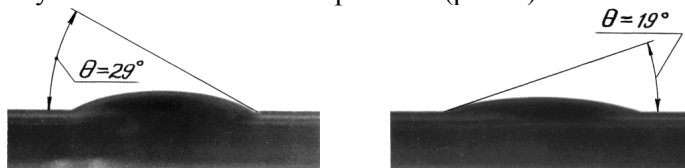


Рис. 4. Капля масла на поверхности образца с шероховатостью $R_z = 0,1$ мкм (а) и $R_z = 2,9$ мкм (б)

На рис. 5 представлен график зависимости величины краевого угла смачивания Θ от шероховатости поверхности для отожженных образцов и для этих же образцов после финишной обработки, перед их отжигом. Отжиг образцы проходили в печи марки HLBO SOLO-300 в среде азота при температуре 850°C.

Данный эксперимент поставлен с целью выявления влияния на смачиваемость степени наклепа поверхности при различной финишной обработке образцов.

Несовпадение кривых 1 и 2 на рис. 5 объясняется тем, что неотожженные образцы обладают большей поверхностной энергией, чем отожженные, т. к. их поверхностный слой в результате финишной обработки наклепан, а у отожженных образцов наклеп снят отжигом. Но тонкая масляная пленка на поверхности образцов ослабляет величину поверхностной энергии, зависящую от наклепа (атома – молекулярного состояния поверхности) в результате чего кривая 2 приближается к кривой 1. Это замечание подтверждается тем, что разница в значениях угла смачивания Θ больше при шероховатости около $R_z = 0,1$ мкм, т. е. в случае, когда при финишной обработке полированием весьма тонкий поверхностный слой наклепывается сильнее.

Скорость растекания масла определялась по описанному выше способу на тех же образцах, на которых измерялись значения краевого угла смачивания и на образцах с ЧРМР. Результаты представлены на рис. 6 и 7.

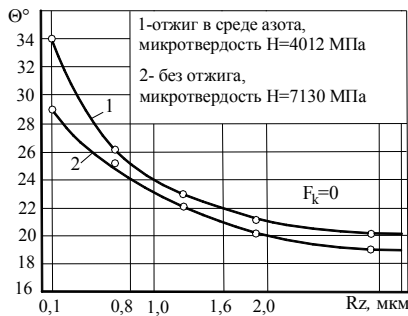


Рис. 5. Зависимость краевого угла смачивания Θ от шероховатости поверхности

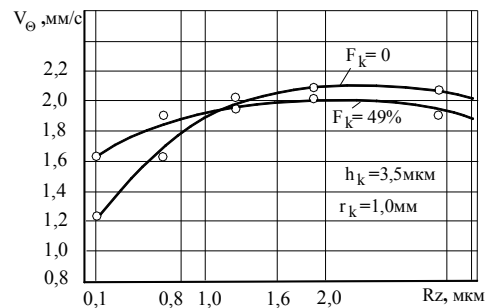


Рис. 6. Зависимость скорости растекания масла V_Θ от шероховатости поверхности

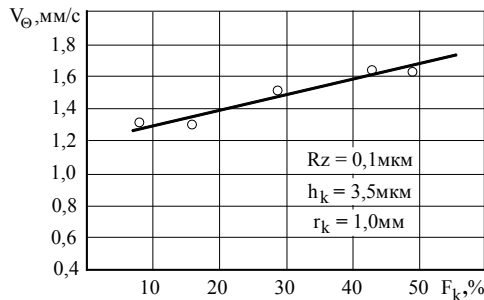


Рис. 7. Зависимость скорости растекания масла V_Θ от относительной площади микроканавок F_k

Результаты контроля смачиваемости поверхности по скорости растекания V_Θ в зависимости от относительной площади микроканавок F_k представлены на рис. 7.

Учитывая, что величина краевого угла смачивания Θ обратно пропорциональна скорости растекания V_Θ , можно сделать вывод при сравнении кривых на рис. 5 и рис. 6, что их характер одинаков. Зависимость Θ и V_Θ от шероховатости поверхности имеют оптимум, соответствующий шероховатости $R_z = 2,0 \dots 3,2$ мкм. Этот оптимум более явно выражен на графике скорости растекания V_Θ и несколько смещен в сторону меньшей шероховатости. Объясняется это тем, что величина угла смачивания измеряется на открытой поверхности, а скорость растекания - между двумя поверхностями. И, если при измерении угла Θ , смачиваемость определяется шероховатостью одной поверхности, то при

контроле V_{Θ} смачиваемость зависит и от шероховатости пленки, которая увеличивает величину капиллярного зазора между исследуемой поверхностью и пленкой.

Характер кривых позволяет равноценно судить о смачиваемости поверхности, как по углу Θ , так и по скорости растекания V_{Θ} , поэтому возможно применение способа контроля смачиваемости по скорости растекания V_{Θ} для поверхностей с ЧРМР.

Возрастание скорости растекания при увеличении F_k вызвано более быстрым растеканием смазочного масла вдоль канавок $V_{\Theta k}$, чем по участкам между канавками V_{Θ} (рис. 8).

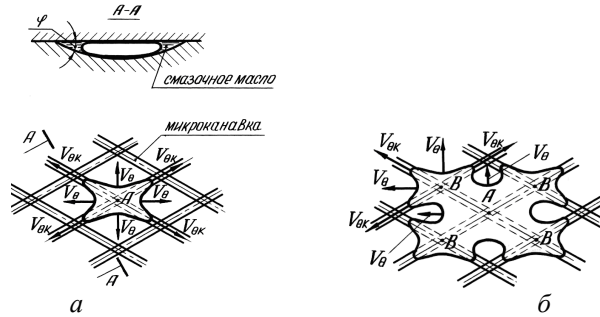


Рис. 8. Механизм растекания масла по поверхности с ЧРМР при граничной смазке:
 а – растекание от точки А; б – дальнейшее растекание от точек пересечения микроканавок – В; $V_{\Theta k}$ – скорость растекания масла вдоль микроканавки; V_{Θ} – скорость растекания масла по поверхности между микроканавками

Это происходит только на тех поверхностях с ЧРМР, у которых участки между канавками имеют шероховатость, не обеспечивающую удовлетворительную смачиваемость. К таким поверхностям относятся поверхности трения прецизионных узлов приборов, работающих в условиях граничной смазки при ресурсном смазывании маслами. Шероховатость таких поверхностей не превышает $R_z = 0,8$ мкм, что снижает их смачиваемость и удержание смазочного масла на поверхности.

В данной работе все эксперименты с использованием поверхностей с ЧРМР проводились на образцах с микроканавками, шероховатость дна и стенок которых была равна $R_z = 0,7 \dots 1,2$ мкм. Шероховатость дна и стенок микроканавок непосредственно после их образования методом ППД не грубее $R_z = 0,5$ мкм. Разница в шероховатости связана с тем, что при доводке образцов алмазной пастой шероховатость дна и стенок микроканавок ухудшалась. Это сказывалось и на скорости растекания масла. Было отмечено, что смазка растекается хуже по канавкам образцов, не прошедших доводку с алмазной пастой.

Растекание масла по канавке происходит благодаря наличию угла φ (рис. 8). Чем меньше величина угла φ , тем выше скорость растекания.

Лучшая смачиваемость поверхностей с ЧРМР в прецизионных узлах трения с высокогладкими поверхностями объясняется зарождением новых центров растекания жидкого смазочного материала в точках пересечения канавок (точки В, рис. 8). Такие точки пересечения характерны для ЧРМР II и III видов [1], (ГОСТ 24773-81). Отсюда следует вывод о том, что поверхности трения с ЧРМР II и III видов обеспечивают лучшее растекание смазки и создают более благоприятные условия для механизма смазки и процесса трения. Это подтверждается результатами многих исследований, подтвердивших оптимальность ЧРМР II и III видов при граничной смазке [1, 3].

Выводы. Разработанный способ контроля смачиваемости поверхностей позволил оценить скорость растекания смазочного масла на поверхностях трения с частично регулярным микрорельефом и, следовательно, скорость самовосстановления разорванной при трении смазочной граничной пленки. Получены данные о скорости растекания смазочного масла в зависимости от шероховатости поверхности и от относительной площади микроканавок F_k поверхностей с ЧРМР.

Результаты экспериментов подтвердили, что на поверхностях с ЧРМР II и III видов скорость восстановления смазочной пленки выше, чем на поверхностях трения без мик-

роуглублений. Это согласуется с результатами испытаний поверхностей трения при граничной смазке [1]. Исследования показали, что можно равноценно судить о смачиваемости поверхности, как по углу Θ , так и по скорости растекания V_{Θ} , поэтому возможно применение способа контроля смачиваемости по скорости растекания V_{Θ} для поверхностей с ЧРМР. Положительное влияние смачиваемости поверхностей с ЧРМР на процесс трения в условиях граничной смазки проявляется на высокогладких поверхностях прецизионных узлов трения с шероховатостью $R_z \leq 0,8$ мкм.

Установлено, что с увеличением относительной площади микроканавок F_k при постоянной ширине микроканавки b_k , смачиваемость поверхности с ЧРМР улучшается.

Лучшей смачиваемостью обладают поверхности с ЧРМР II и III вида. Это объясняется наличием большого числа центров растекания, находящихся в точках пересечения микроканавок между собой. Растекание масла и самовосстановление смазочной пленки на поверхности трения с ЧРМР происходит лучше в микроканавках с большим радиусом и меньшей глубиной. Чем больше радиус и меньше глубина микроканавки, тем меньше угол ϕ (рис. 8) и выше скорость растекания.

Список литературы

1. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – Л.: Машиностроение, 1982 – 248 с.
2. Способ определения маслоемкости поверхностей трения: А. с. 985549 СССР, МКИ F 16 N 29/02// G 01 N 11/ 00 / А.В. Радионенко (СССР) - № 3321642/25 – 08; Заявл. 20.07.81; Опубл. 30.12.82, Бюл. № 48. – 110 с.
3. Радиненко А.В. Модель трения поверхностей с частично-регулярным микрорельефом и их технологическое обеспечение / А.В. Радиненко, М.В. Киндрачук // Проблемы трибологии. – 2005. – № 1. – С. 59-68.

Стаття надійшла до редакції 04.06.2013

M. V. KINDRACHUK, A. V. RADIONENKO, V. M. KINDRACHUK

RESEARCH OF WETTABILITY OF FRICTION SURFACES WITH PARTIALLY REGULAR MICRORELIEF

The problems of friction surfaces wettability, lubricating oil running and adhesion depending on the roughness of the surface, the extent of running – in and free superficial energy of friction surfaces are considered. Technological method of partially regular microrelief formation on the friction surface is described (PRMR). To control wettability of cylindrical surfaces with partially regular microrelief a technique has been developed which allows the error effects due to the form of the surfaces studied to be eliminated. The experimental procedure and the results obtained in the study of the influence of geometrical parameters of partially regular microrelief on the rate of lube oil running have been presented.

Keywords: friction surfaces wettability; partially regular microrelief; rate of lube oil running.

M. V. КИНДРАЧУК, А. В. РАДІОНЕНКО, В. М. КИНДРАЧУК

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМОЧУВАНІСТІ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ З ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНИМ МІКРОРЕЛЬЄФОМ

Розглянуті питання змочуваності поверхонь тертя, розтікання і адгезії мастильної олії залежно від шорсткості поверхні, від міри прироблення і від вільної поверхневої енергії поверхонь тертя. Описаний технологічний спосіб утворення на поверхні тертя частково регулярного микрорельєфу (ЧРМР).

Ключові слова: змочуваність поверхонь тертя, частково регулярний микрорельєф, швидкість розтікання мастильної олії.

Киндрачук Мирослав Васильевич – д-р техн. наук, профессор, заведуючий кафедрой машиноведения Национального авиационного университета, kindrachuk@ukr.net

Радионенко Александр Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Приазовского государственного технического университета, г. Мариуполь.

Киндрачук Виталий Мирославович – канд. техн. наук, докторант Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины.