

ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТВЕРДЫМИ ДОБАВКАМИ В ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕВЕРСИВНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВАЛА

© 2015 С.Г. Докшанин

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Статья поступила в редакцию 23.11.2015

Рассматривается возможность увеличения долговечности опор скольжения, рабочие поверхности которых в режиме реверсивного движения подвергаются значительному износу из-за воздействия знакопеременных сдвиговых деформаций. Цель работы заключается в оценке эффективности применения смазочных материалов с твердыми добавками ультрадисперсного алмазографита для снижения износа деталей в условиях реверсивного трения. Приводятся результаты исследования влияния смазочных материалов на величину сил трения и интенсивность изнашивания образцов. Сделан анализ состояния поверхностей трения и изменение микрорельефа после применения исследуемых смазочных материалов. Полученные результаты показали эффективность применения смазочных материалов с ультрадисперсным порошком алмазографита. Результаты исследований могут быть применены для выбора смазочных материалов, которые используются для узлов трения, работающих в режиме знакопеременного движения.

Ключевые слова: касательные напряжения, площадь контакта, смазочный материал, ультрадисперсная добавка, реверсивное трение

Повышение долговечности узлов машин и механизмов за счет снижения износа до сих пор является одной из важнейших задач эффективного использования оборудования, поскольку до 90% причин отказов связано именно с износом деталей узлов. При этом не только нагрузка, скорость и применяемый для деталей материал оказывают влияние на процесс изнашивания, но и вид движения трущихся поверхностей. Наиболее заметно такое влияние наблюдается у пар трения, эксплуатирующихся в режимах возвратно-поступательного или качательного движений, например, плунжерные пары, детали цилиндропоршневой группы, шарниры шатунов, толкатели и направляющие кулачковых механизмов и ряд других узлов. В таких узлах сила трения в пределах одного рабочего хода элемента имеет сложный характер. Исследование износостойкости узлов, работающих в режиме реверсивного трения, отмечает, что износ деталей в таких парах увеличивается более чем в два раза в сравнении с парами, работающими однонаправлено [1, 2].

Отрицательное действие реверса связано с деформационно-напряженным состоянием материала. Постоянное изменение направления движения заставляет деформации в течение короткого времени изменяться с растяжения на сжатие и наоборот. В зоне контакта на элементарный объем материала будут действовать циклически изменяющиеся напряжения от нормального сжатия и знакопеременных касательных

напряжений от сил трения, возникающих на поверхности контакта. В результате такое сочетание условий работы, как проскальзывание при трении контактирующих поверхностей и повышение нагрузок, может вызвать рост напряжений на площадке контакта, что приводит к ускорению усталостных процессов. Многократное повторно-переменное деформирование трущихся поверхностей снижает износостойкость материала, как при трении скольжения, так и при трении качения [3-5].

Поскольку действующие силы трения прямо влияют на напряженное состояние, то снижение их величины позволит уменьшить отрицательный эффект от реверсивного трения. Одним из методов защиты от усталостных повреждений являются снижение коэффициента трения и предотвращение проскальзывания контактирующих поверхностей. Снизить скорость изнашивания и повысить долговечность узлов в режиме реверсивного трения можно за счет используемого смазочного материала, а также толщины смазочной пленки на трущихся поверхностях. Применяемые смазочные материалы должны обладать преимущественно антифрикционными свойствами для снижения сил трения, при этом механизм смазочного действия может быть различным и зависеть от условий контактирования. В этом случае для улучшения антифрикционных свойств применяемых смазочных материалов могут быть использованы функциональные твердые добавки, например ультрадисперсные порошки алмазографита (УДПАГ).

Докшанин Сергей Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика».
E-mail: Sergey_dokshinin@mail.ru

Цель работы: установление возможности использования пластичных смазочных материалов с добавкой УДПАГ в узлах с реверсивным трением, в частности, опор скольжения.

Эффективность применения смазочных композиций с УДПАГ оценивалось в соответствии с методами рационального цикла трибологических испытаний. Исследования проводились на машине трения по схеме «вал-втулка». Узел работал без пополнения смазочного материала в режиме реверсивного трения с углом качания 28° при скорости трения 2,58 см/с. Вал изготавливался из стали 30ХГСНА, втулка (образец) – из стали 30ХГСА. рабочие поверхности образцов обрабатывались до шероховатости $R_a=0,12-0,65$ мкм, поверхность вала – $R_a=0,34-1,3$ мкм, после термообработки твердость образцов HRC 30–32. Испытания смазочных композиций проводились при удельном давлении в зоне трения до 18 МПа при заданном пути трения 60 м.

Для создания смазочных композиций с УДПАГ применялись пластичные смазочные материалы марок ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74) и Солидол С (ГОСТ 4366-76). Смазочный материал ЦИАТИМ-201 загущен литиевым мылом, механически стабилен, имеет хорошие морозостойкие свойства и может работать в широком

интервале температур. Смазочный материал Солидол С относится к кальциевым смазочным материалам, обладает несколько узким диапазоном рабочих температур и низкой механической стабильностью, тем не менее имеет хорошие антифрикционные свойства по сравнению с литиевыми. Вводимая в базовый смазочный материал твердая добавка представляла углеродсодержащий ультрадисперсный порошок, полученный детонационным методом в среде углекислого газа. Размер частиц порошка до 40 нм, доля графита – около 80 %, другая часть находится в виде высокодисперсной алмазоподобной фаз; концентрация добавки в пластичных смазочных материалах составляла от 0,5 до 1,5 масс. %. Определение эффективности вводимой добавки, ее влияние на эксплуатационные свойства разрабатываемых смазочных композиций, а также установление условий их применения в узлах с реверсивным трением выполнялись по величине силы трения, износа образцов, состоянию контактирующих поверхностей. Изображенные на рис. 1 и 2 графики показывают изменение коэффициента трения при использовании базовых смазочных материалов и созданных на их основе смазочных композиций.

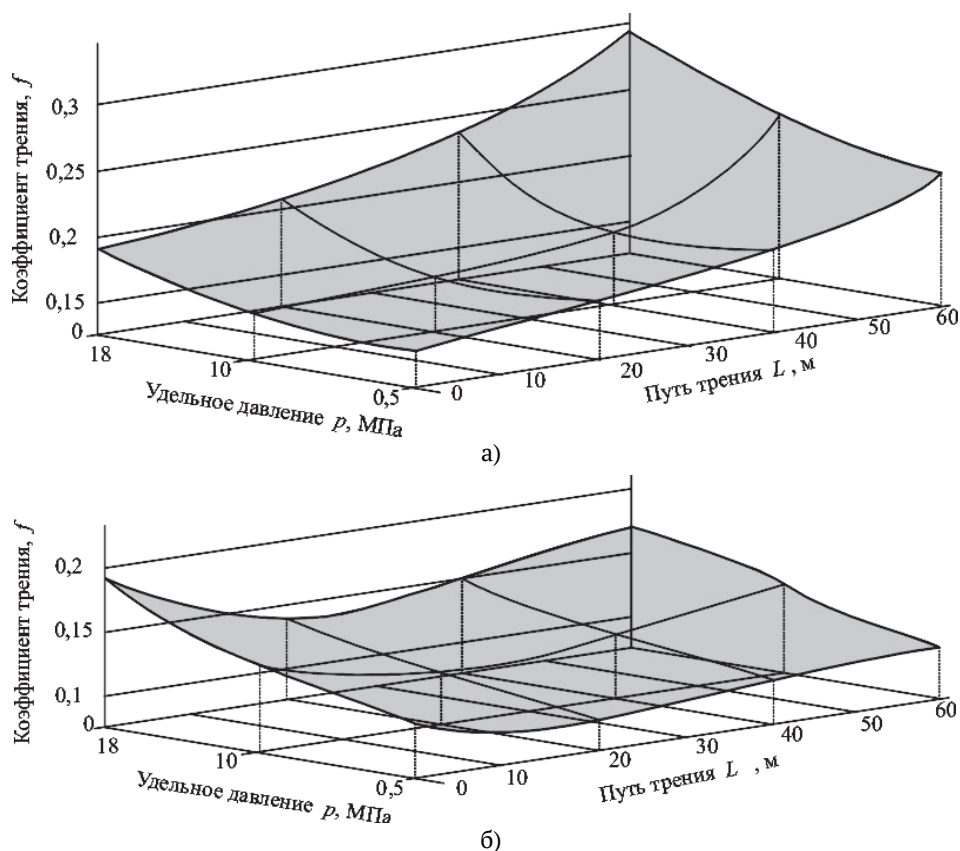


Рис. 1. Изменение коэффициента трения для смазочного материала ЦИАТИМ-201: а - без добавки УДПАГ; б - с добавкой УДПАГ

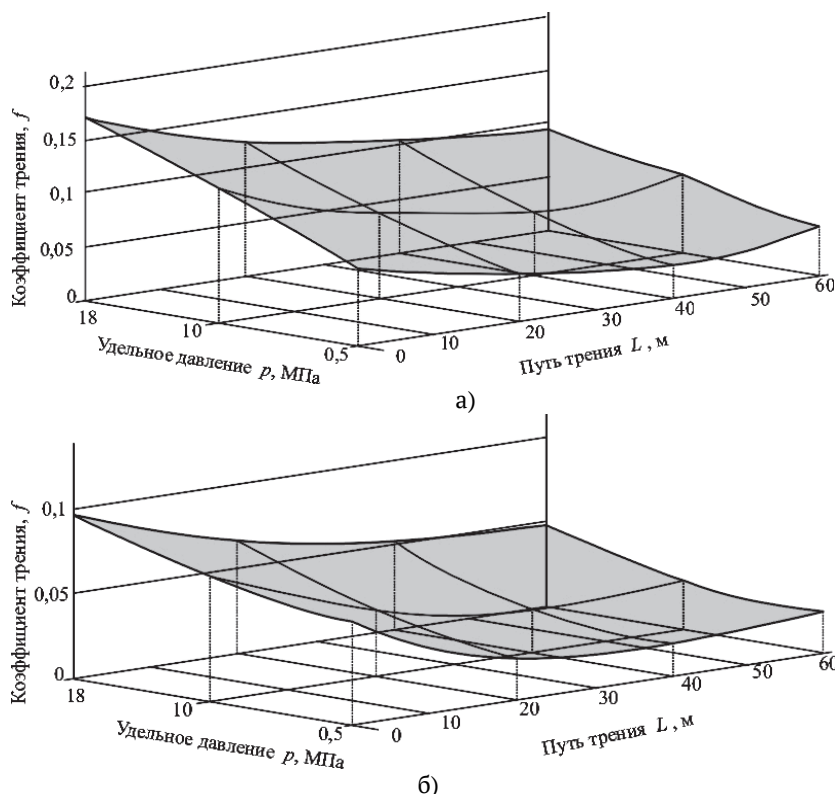


Рис. 2. Изменение коэффициента трения для смазочного материала Солидол С:
а - без добавки УДПАГ; б - с добавкой УДПАГ

Износ образцов измерялся методом искусственных баз при нанесении на трущуюся поверхность отпечатка правильной формы. Так, на рис. 3 представлены фотографии состояния поверхностей трения с отпечатками для определения износа, полученные после проведения испытаний со смазочным материалом ЦИАТИМ-201 без добавки и после её введения. Углубление было нанесено вдавливанием пирамиды на микротвердомере ПМТ-3. Для данного метода величина линейного износа для отпечатка в виде квадратной пирамиды на вогнутой поверхности определяли по формуле [6]:

$$\Delta h = \frac{(d_1 - d_2)}{m} - \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{8R},$$

где h – глубина отпечатка; Δh – величина линейного износа; d_1 – длина диагонали отпечатка до испытаний; d_2 – длина диагонали отпечатка после испытаний; R – радиус поверхности, на которую нанесли отпечаток; m – коэффициент пропорциональности для отпечатков, представляющих геометрически правильную пирамиду (для угла $\alpha=136^\circ$ $m=7$).

Анализ снимков, полученных после проведения испытаний, позволяет судить о том, что УДПАГ оказывает значительное влияние на микрорельеф поверхностей трения.

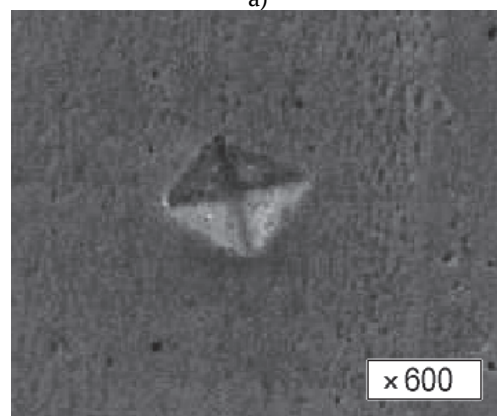
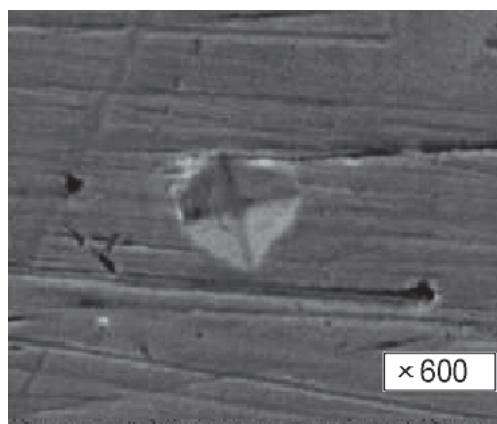


Рис. 3. Внешний вид дорожек трения на пластине после испытаний со смазочным материалом ЦИАТИМ-201:
а - без добавки УДПАГ б - с добавкой УДПАГ

Можно отметить заметное сглаживание неровностей, снижение количества раковин, царапин, следов коррозионного износа. Такое изменение шероховатости увеличивает фактическую площадь контакта, что снижает контактные давления и более равномерно распределяет нагрузки по контурным площадям контакта. Так, на рис. 4 и 5 представлены фотографии состояния дорожек трения, полученные после проведения испытаний со смазочными материалами без добавки и после её введения.

Рассмотрение других результатов, полученных в ходе проведения исследований, также позволяет сделать выводы об эффективности введения твердой добавки УДПАГ в пластичную

смазку. Определялась глубина повреждений, изменение величины шероховатости R_a/R_{a0} до и после испытаний, а также общее состояние поверхности. Исследования обнаружили, что по этим показателям после введения ультрадисперсного алмазографита лучшим является смазочный материал ЦИАТИМ-201, приводящий к качественному изменению микрорельефа трущейся поверхности. После испытаний для ЦИАТИМ-201 средняя величина отношения R_a/R_{a0} для смазочного материала без добавки составила $R_a/R_{a0}=2,7$, при введении УДПАГ оно снизилось и равнялось $R_a/R_{a0}=1,61$. Для солидола (С) это отношение изменилось незначительно: 1,14 и 1,06 – без добавки УДПАГ и с добавкой соответственно.

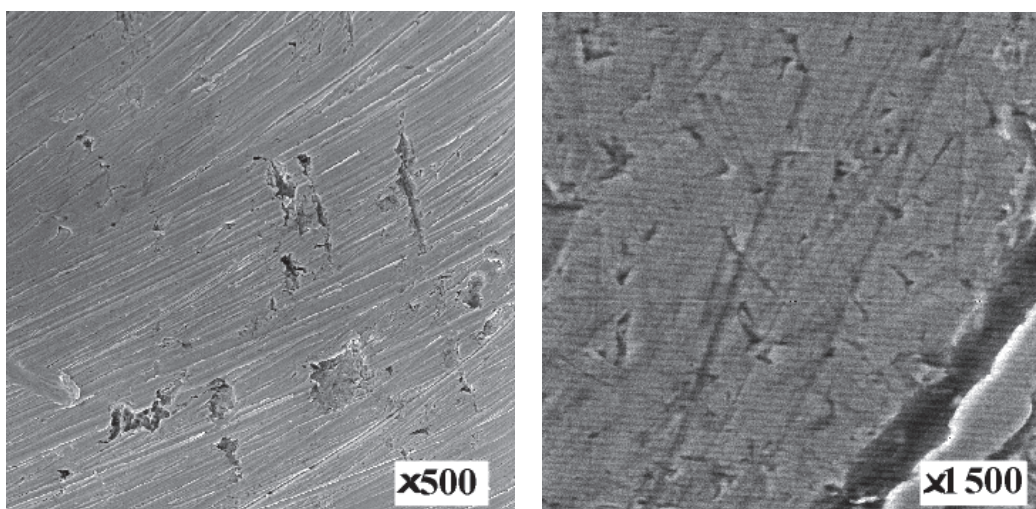


Рис. 4. Внешний вид дорожек трения на пластине после испытаний со смазочным материалом ЦИАТИМ-201 без добавки УДПАГ

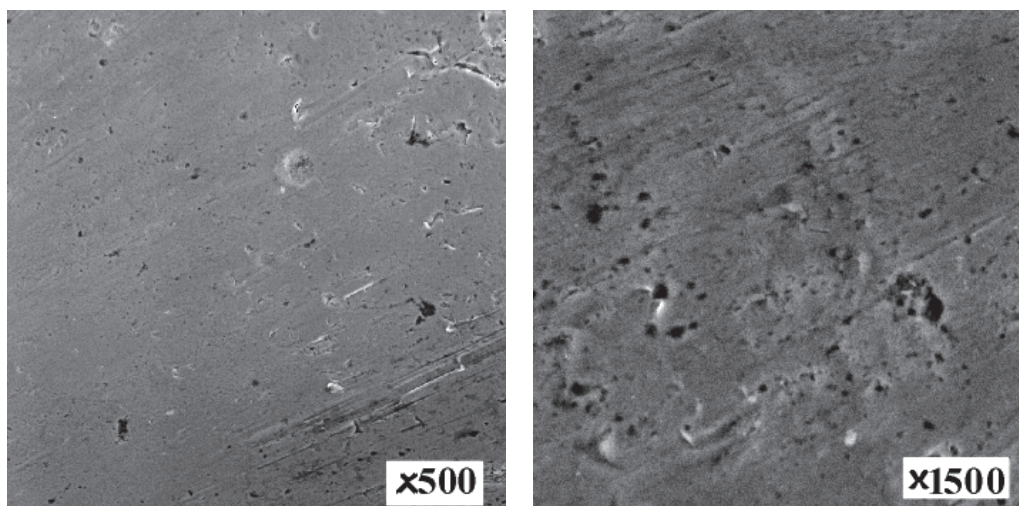


Рис. 5. Внешний вид дорожек трения на пластине после испытаний со смазочным материалом ЦИАТИМ-201с добавкой УДПАГ

Результаты проведенных исследований позволили предположить причины проявления хороших триботехнических характеристик

смазочных материалов с добавкой УДПАГ. Основная причина повышенного износа при реверсивном трении – интенсивное развитие

усталостных трещин, вызванное знакопеременными деформациями. Пластические деформации возникают в материале тогда, когда касательное напряжение по площадке результирующего сдвига достигает определенной величины, свойственной данному материалу. Из условий пластичности можно установить определенные соотношения между возникающей на поверхности силы трения и пределами текучести на сжатие, растяжение и сдвиг, определяющие разрушение материала. Условия нагружения контактирующих поверхностей вала и втулки при действии между ними сил трения, при которых касательные и нормальные нагрузки связаны зависимостью [7]:

$$|\tau(x)| = \mu \cdot |\sigma(x)|,$$

где $\tau(x)$ и $\sigma(x)$ – тангенциальные и нормальные напряжения в соответствующей точке площадки контакта соответственно, μ – коэффициент трения.

Сила трения наиболее всего влияет на сдвиговые напряжения, которые при смене направления движения приводят к частому пластическому деформированию. Растягивающие компоненты напряжений и деформаций, вызванные повышением силы трения, приводят к снижению критического уровня нагрузки, которую деталь может выдержать без катастрофических разрушений. Происходит снижение предела выносливости материала и возможность скорого образования усталостных трещин. В пределах одного хода наибольшие значения сил трения будут наблюдаться для участков, где происходит перемена направления движения. Замедление движения в этих зонах приводит к уменьшению толщины смазочной пленки, а иногда и к ее разрушению. Это может быть связано с ростом температуры трения при пластической деформации и образовании наклепа поверхностных слоев.

Несколько слов о смазке опор с подшипниками скольжения. Смазочный процесс при использовании пластичного смазочного материала имеет некоторое отличие от смазки жидкими маслами. Применение масел способствует установлению в подшипнике скольжения жидкостного режима трения, и контактирующие поверхности деталей будут полностью разделены смазочным слоем, антифрикционные свойства масел связаны с вязкостью. При использовании пластичных смазочных материалов в основном устанавливаются граничный или смешанный режимы трения. Это обусловлено состоянием смазочного материала, когда в условиях работы происходит его выдавливание с пути трения. На трущихся поверхностях остается только тонкая

смазочная пленка, которая и воспринимает в процессе работы все контактные нагрузки. Вязкость смазочного материала при этом не оказывает влияния на качество смазывания поверхностей, а эффективность смазки и прочность оставшейся смазочной пленки определяют только эксплуатационные свойства. Однако действие больших нагрузок и значительный рост поверхностной температуры может привести к ее разрыву и, как следствие, схватыванию контактирующих поверхностей. Вот здесь и требуется использование твердых добавок, которые могут создать на поверхности детали прочный слой с хорошими адгезионными способностями, воспринимающий на себя нормальные и касательные нагрузки, удерживающий смазочную пленку на трущихся поверхностях и предотвращающий ее разрыв.

Заметное улучшение эксплуатационных свойств пластичных смазочных материалов при введении в них УДПАГ наблюдается именно для граничных режимов трения. При жидкостных режимах нерастворимый и химически инертный УДПАГ не влияет на изменение состава смазочного материала. Он «теряется» в его объемах, слабо выражая свои свойства. При граничном режиме УДПАГ начинает хорошо проявлять свои адгезионные способности к металлическим поверхностям благодаря повышенной поверхностной энергии, которой частицы порошка обладают за счет способа получения. Довольно малый размер частиц УДПАГ позволяет им проникать в структурный каркас пластичного смазочного материала, что приводит к упрочнению граничной пленки и повышению сопротивляемости к разрушению. Наличие собственного заряда образует ориентированные слои и прочно удерживает смазочную пленку на контактирующих поверхностях. Это повышает способность пленок смазочного материала выдержать значительные нагрузки без разрушения и препятствует образованию локальных металлических связей.

Положительные результаты исследований также могут быть связаны с процессами приработки трущихся поверхностей, когда происходит образование новой шероховатости при сглаживании наиболее выступающих неровностей. Образование нового микрорельефа в процессе приработки образцов в среде смазочного материала с УДПАГ можно связать с влиянием частиц введенной добавки. Имея множество кромок вследствие своей поликристаллической структуры, частицы алмаза являются своего рода микрорезцом. Происходит микрошлифование поверхностных слоев, удаляются неглубокие усталостные микротрещины, сглаживаются микронеровности. Это увеличивает интенсивность приработочного износа в начальный момент работы узла трения,

чем и можно объяснить быстрый нагрев и повышение коэффициента трения в этот период работы. Процесс приработки будет происходить до тех пор, пока микронеровности не приобретут размеры, обеспечивающие увеличение фактической площади контакта и приводит к перераспределению нагрузки и снижению контактных напряжений, что подтверждают ранее проведенные исследования [8]. При этом сокращается времени приработки трущихся поверхностей до начала выхода на эксплуатационный режим позволяет стабилизировать значения поверхностной температуры и исключить возможное в этот период схватывание трущихся поверхностей.

Таким образом, наличие смазочного материала, способного значительно снизить силы трения, снижает величину внутренних напряжений и задерживает развитие усталостных трещин на участках перемены направления движения. При снижении сил трения зона образования усталостных трещин будет перемещаться вглубь материала, что приводит к увеличению времени до начала наступления катастрофического усталостного износа материала на контактирующих поверхностях.

Выводы: с введением УДПАГ в пластичный смазочный материал, используемый в узлах с реверсивным трением, происходит снижение величины силы трения на 65–70% и уменьшается глубина повреждений трущейся поверхности на 24–28%. Сравнительный анализ значений контактных напряжений, определенных с помощью компьютерного моделирования, показал, что при

включении в пластичный смазочный материал добавки УДПАГ происходит снижение величины контактных напряжений на 18–20%. Это увеличивает время до начала фреттинг-усталостного разрушения поверхности и позволяют продлить срок службы узлов трения в 1,5–2 раза по сравнению с базовыми смазочными материалами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евдокимов, В.Д.* Реверсивность трения и качество машин. – Киев: Техника, 1977. 148 с.
2. *Козаев, В.П.* Прочность и износостойкость деталей машин / *В.П. Козаев, Ю.Н. Дроздов.* – М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
3. *Гаркунов, Д.Н.* Триботехника (износ и безысходность). – М.: Издательство МСХА, 2001. 617 с.
4. *Махутов, Н.А.* Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность / *Н.А. Махутов.* В 2 ч. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2005. Ч.1. 494 с.
5. *Сосновский, Л.А.* Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин / *Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов.* – М.-Гомель: НПО «Трибофатика», 2000. 304 с.
6. *Хрущов, М.М.* Определение износа деталей машин методом искусственных баз / *М.М. Хрущов, Е.С. Беркович.* – М.: Издательство АН СССР, 1959. 220 с.
7. *Горячева, И.Г.* Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. 78 с.
8. *Докшанин, С.Г.* Моделирование контактных напряжений на поверхности качения с учетом сил трения / *С.Г. Докшанин, И.И. Докшанина* // *Технология машиностроения.* 2008. №9. С. 62–64.

USING THE LUBRICANTS WITH SOLID ADDITIVES IN THE SLIDING SUPPORT WITH THE REVERSE MOVEMENT OF THE SHAFT

© 2015 S.G. Dokshinin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Possibility of increase in durability of sliding supports which working surfaces in the mode of reverse movement are exposed to considerable wear because of impact of sign-variable shift deformations is considered. The purpose of work consists in assessment the efficiency of using lubricants with solid additives of ultradisperse diamond-graphite for decrease in wear of details in the conditions of reverse friction. Results of research the influence of lubricants at a size of friction forces and intensity of wear of samples are given. The analysis of condition of friction surfaces and change of microrelief after using the studied lubricants is made. The received results showed efficiency of using the lubricants with ultradisperse powder of diamond-graphite. Results of researches can be applied to choice the lubricants which are used for the knots of friction working in the mode of the sign-variable movement.

Key words: tangent stress, contact area, lubricant, ultradisperse additive, reverse friction.