

УДК 621.891.2

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДОБАВКАМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ АЛМАЗОГРАФИТОВОЙ ШИХТЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР ТРЕНИЯ

*канд. техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК, канд. физ.-мат. наук В.А. КУКАРЕКО
(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск)*

Показана эффективность применения добавок ультрадисперсных алмазографитовых композиций в жидкие смазочные материалы на стадии приработки пар трения. Установлено, что модифицирование жидких смазочных материалов ультрадисперсными кластерами синтетического углерода увеличивает несущую способность масляной пленки при повышенных температурах и расширяет диапазон рабочих температур модифицированных масел.

Триботехнические испытания с высокими контактными давлениями указывают на зависимость эффективности модифицирования смазки от исходной твердости поверхности материалов пар трения.

Введение. Наноструктурные материалы представляют собой новый класс материалов, обладающих уникальными физико-механическими, электрическими, оптическими и другими характеристиками, что позволяет использовать их для создания изделий с новыми потребительскими свойствами.

В последние годы получило развитие новое научное направление в материаловедении, базирующееся на принципах формирования материала с наноразмерными структурными составляющими. Эти подходы начали широко использоваться при создании материалов триботехнического назначения, в том числе для модифицирования смазочных материалов. Дисперсность частиц твердой фазы в значительной степени определяет характер протекания различных физико-химических процессов в зоне трибоконтакта. Наноразмерные частицы ввиду своей особой активности способствуют образованию продуктов с новыми функциональными характеристиками. Использование твердых модификаторов в смазочных материалах направлено на изменение микрорельефа поверхности трения с целью увеличения фактической площади контакта и повышение несущей способности разделительного слоя смазки в зоне контакта, препятствующего непосредственному взаимодействию элементов пар трения. Применение наномодификаторов с высокой адсорбционной активностью относится к эффективным методам создания новых смазочных материалов, характеризующихся повышенными триботехническими свойствами. При этом в качестве модификаторов используются материалы различной природы: металлы, полимеры, сульфиды, фториды, различные модификации углерода [1 - 5]. Добавки в триботехнические материалы высокодисперсных углеродосодержащих продуктов детонационного синтеза (наноалмазов, алмазографитовой шихты), фуллеренов и фуллереноподобных структур весьма эффективно с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик трибосопряжений и увеличения их ресурса [4-7]. Вместе с тем модифицирование наноразмерными алмазографитовыми смесями требует квалифицированного подхода к подбору материалов пар трения и выбору оптимальных режимов эксплуатации трибосопряжений. Несмотря на появившееся в последнее время большое количество публикаций по использованию наноразмерных частиц для модифицирования смазочных материалов, в литературе отсутствуют систематические данные об эффективности применения твердых наномодификаторов в зависимости от механических свойств материалов пар трения и параметров их эксплуатации.

Цель работы - установление закономерностей влияния алмазографитовых добавок на формирование структуры поверхностей трения при использовании материалов различной твердости и триботехнические свойства фрикционных сопряжений при различных схемах нагружения.

Методы исследований. Исследования триботехнических характеристик проводились при граничном трении с использованием промышленных масел И-20А и И-40А (ГОСТ 20799-75), моторного масла МС-20 (ГОСТ 21743-76) и турбинного масла Тп-22 (ГОСТ 9972-74). В качестве модифицирующей добавки использовалась алмазографитовая шихта УДАГ-СП (ТУ РБ 28619110-001-95). Триботехнические испытания проводились на автоматизированном трибометре АТВП, работающем по схеме возвратно-поступательного перемещения, и установке МТ-2, в которой реализована схема фрикционного контакта «палец - торец диска». Образцы для исследований изготавливались из проката стали 45 (С - 0,43; Si - 0,23; Mn - 0,62; Cr - 0,22 мас. %) (в отожженном, и закаленном состояниях) и из композиционного материала КЛ-08 (ТУ РБ 100354447.060-2004), имеющего матрицу из кремнемарганцевой бронзы и армирующие элементы в виде гранул из чугуна ДЧЛ. Отжиг образцов стали 45 проводился при 860 °С в течение 30 мин с последующим охлаждением с печью (твердость $HV = 1700$ МПа). Закалка образцов стали 45 проводилась от 850 °С с охлаждением в подсолонной воде. Твердость закаленных образцов стали 45 составляла 6000...6400 МПа. В качестве контртела использовались закаленная в масле сталь 45 ($HV = 4500...5000$ МПа, закаленная сталь 60Г

($HV = 6700 \dots 7000$ МПа) или закаленная сталь У8 ($HV = 8000$ МПа). Номинальное давление при триботехнических испытаниях составляло от 5 до 30 МПа. Средняя скорость перемещения образца относительно контртела в процессе трибоиспытаний на трибометре АТВП составляла примерно 0,1 м/с, при испытаниях на машине трения МТ-2 скорость перемещения образца составляла 0,6 м/с. Триботехнические испытания проводились в диапазоне температур от 20 до 140 °С.

Для исследования фазовых и структурных превращений в поверхностях трения использовался рентгеноструктурный анализ с использованием дифрактометра ДРОН-3.0 (монохроматизированное CoK_α -излучение, $V = 30$ кВ, $I = 10$ мА). Рентгеновская съемка осуществлялась с фокусировкой по Брегу – Брентано в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1° и временем набора импульсов на точку, равным 40 с. Для фазового анализа использовалась стандартная картотека PDF. При определении величины физического уширения дифракционных линий матричной фазы β , связанной с плотностью дефектов кристаллической решетки в поверхностных слоях, использовался метод аппроксимации [8].

Измерение твердости по Виккерсу проводилось при нагрузке 49 и 296 Н. Измерение микротвердости осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе Микро-200 ПЛАНАР. В качестве триботехнических характеристик, подлежащих оценке в процессе испытаний, были выбраны коэффициент трения и интенсивность изнашивания, при этом интенсивность изнашивания рассчитывалась по линейному или весовому износу.

Результаты их обсуждение. Исследование влияния температурного режима на коэффициент трения и интенсивность изнашивания, проведенное при триботехнических испытаниях по схемам возвратно-поступательного перемещения и фрикционного контакта «палец – торец диска», показали, что характер изменения коэффициента трения при нагреве во многом определяется вязкостью масла. При этом было установлено, что для модифицированных и немодифицированных масел увеличение температуры смазки приводит к возрастанию коэффициента трения f фрикционной пары и появлению периодических всплесков его значений. По нашему мнению, увеличение f вызвано понижением вязкости масляного слоя и уменьшением его толщины, вследствие чего усиливается взаимодействие выступов контактирующих поверхностей при трении и интенсифицируется их приработка. Вместе с тем модифицирование масла добавками ультрадисперсной алмазографитной шихты сдвигает предел несущей способности масляной пленки в область более высоких температур. Так, при испытаниях по схеме возвратно-поступательного перемещения для образцов композиционного материала КЛ-08 в паре с закаленной сталью 45 в среде немодифицированного масла МС-20 при температуре 20 °С коэффициент трения покоя f_s и динамический коэффициент трения f_d составляют соответственно 0,030 и 0,0085. По мере повышения температуры смазки значения коэффициентов трения начинают увеличиваться. При этом особенно резкое их возрастание происходит в области температур 45...50 °С. В диапазоне температур 55...65 °С коэффициенты трения стабилизируются на уровне $f_s = 0,125 \dots 0,135$ и $f_d = 0,035 \dots 0,045$, а при температуре выше 70 °С из-за резкого снижения вязкости масла и его выдавливания из зоны контакта наблюдается задиры. Испытания модифицированного УДАГ масла МС-20 показали, что при температуре 25...35 °С добавка УДАГ к маслу МС-20 не приводит к значительному снижению коэффициента трения ($f_s = 0,025 \dots 0,030$; $f_d = 0,0065 \dots 0,075$), так как в этом диапазоне температур масло сохраняет высокую несущую способность. В процессе нагрева до температуры 60 °С для модифицированного масла наблюдается менее резкое возрастание коэффициентов трения и их значения при этом в 2 раза ниже, чем для немодифицированного масла ($f_s = 0,06$; $f_d = 0,007$). Признаки задиры для модифицированного масла МС-20 начинают появляться только при его разогреве свыше 90 °С.

В диапазоне температур 55...60 °С в режиме установившегося трения интенсивность линейного изнашивания композита при использовании модифицированной жидкой смазки МС-20 составляла $(3,5 \dots 4,7) \cdot 10^{-9}$, в то время как для немодифицированной смазки в этом диапазоне температур она равнялась $(5,6 \dots 7,2) \cdot 10^{-9}$.

При триботехнических испытаниях пары «композит КЛ-08 – закаленная сталь 45», проводимых в среде маловязкого турбинного масла Тп-22 (номинальное давление 8 МПа), положительное влияние добавок УДАГ начинает проявляться уже при комнатной температуре. Так, в случае испытаний с немодифицированным маслом Тп-22 при температуре 20 °С статический и динамический коэффициенты трения составляют $f_s = 0,093$ и $f_d = 0,077$, процесс приработки пары трения проходит медленно. Добавка УДАГ к турбинному маслу приводит к резкому снижению силы трения в течение цикла испытания (рис. 1), что проявляется в двукратном уменьшении значений коэффициента трения покоя и десятикратном снижении динамического коэффициента трения ($f_s = 0,05$, $f_d = 0,0065$).

Проведенные триботехнические испытания по схеме фрикционного контакта «палец – торец диска» также подтвердили взаимосвязь модифицирующего действия ультрадисперсных алмазографитных добавок с реологическими свойствами масла. Так, установлено, что в случае использования немодифицированного масла И-40А при испытаниях пары трения «закаленная сталь 45 – закаленная сталь 65Г»

при нагрузке 10 МПа и скорости скольжения 0,6 м/с по мере повышения температуры от 20 до 140 °С наблюдается изменение значений коэффициента трения в интервале 0,04...0,13. Причем характер этих изменений практически идентичен характеру повышения температуры, в то время как в среде модифицированного УДАГ масла И-40А коэффициент трения стабилизируется на уровне 0,09...0,10 в широком диапазоне температур (60... 100 °С), при этом нивелируется отрицательное влияние снижения вязкости масла при нагреве. Зафиксированные более высокие значения коэффициента трения на начальном этапе испытаний при температуре ниже 50 °С для модифицированного масла может объясняться более интенсивным протеканием в этом случае процессов приработки трущихся поверхностей. Интенсивность весового изнашивания составила для испытаний в среде немодифицированного масла И-40А 0,032 мг/км, а для модифицированного - 0,026 мг/км.

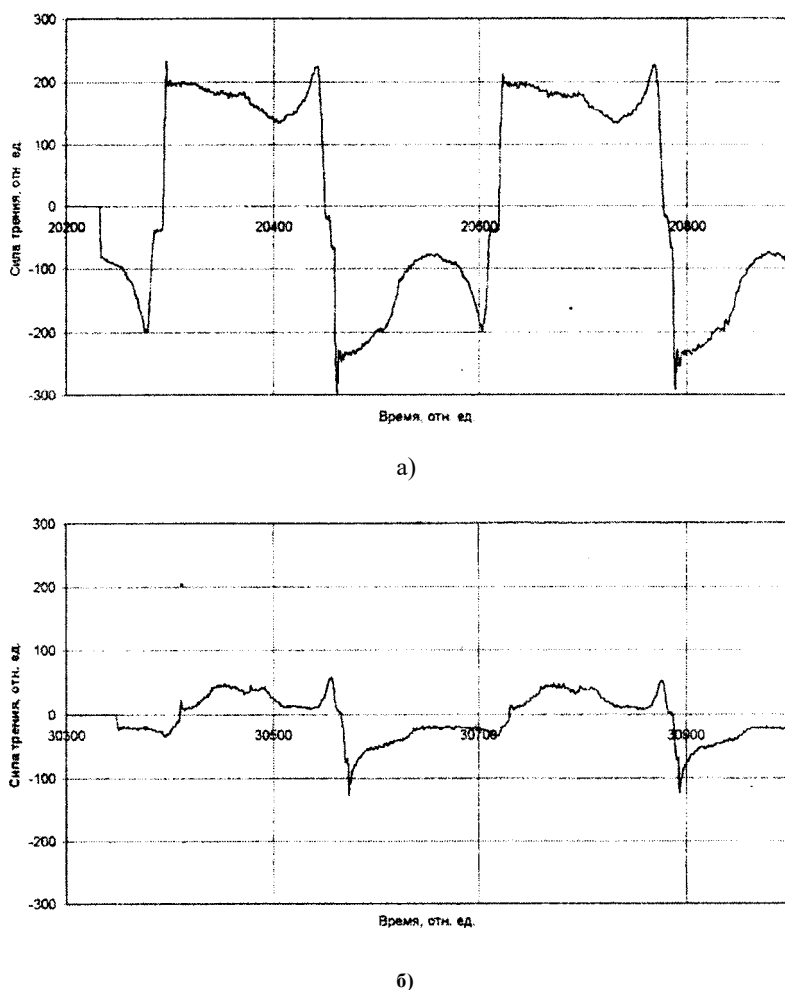


Рис. 1. Изменение силы трения в течение цикла испытаний композита КЛ-08 в среде немодифицированного (а) и модифицированного УДАГ (б) масла Тп-22 при температуре 20 °С и удельной нагрузке 8 МПа, контртело - закаленная сталь 45

Исследование влияния давления испытаний на триботехнические свойства фрикционной пары «отожженная сталь 45 - закаленная сталь 60Г» при работе в среде немодифицированной и модифицированной добавками УДАГ смазки И-20А проводились по схеме возвратно-поступательного перемещения контактирующих тел. Номинальное контактное давление испытаний p_d составляло 10, 20 и 30 МПа. Испытания проводились на пути трения 3000...5000 м.

В результате испытаний установлено, что в случае испытаний с относительно низким номинальным контактным давлением (10 МПа) весовой износ образцов стали 45 при трении в среде модифицированной смазки И-20А существенно превышает (примерно в 2 раза) весовой износ образцов, испытываемых в немодифицированной смазке. Коэффициент трения фрикционной пары, работающей в среде модифицированной смазки, на начальных стадиях испытаний $f_d = 0,10...0,11$ и затем, по мере увеличения пути трения l , регистрируется постепенное снижение значений коэффициента трения до 0,08...0,09 ($l \sim 1000... 1500$ м) и

до 0,07...0,08 ($l \approx 2500...3000$ м). Подобное изменение коэффициента трения связано с процессами приработки фрикционной пары. В случае немодифицированной смазки ход зависимости коэффициента трения от пути трения аналогичен описанному выше ходу зависимости для смазки с УДАГ. Вместе с тем процессы приработки контактирующих поверхностей в немодифицированной смазке замедлены, и значения коэффициента трения на поздних стадиях испытаний превышают соответствующие значения f для случая испытаний со смазкой, содержащей добавку УДАГ.

Увеличение номинальных давлений испытаний до 20 МПа приводит к сближению зависимостей весового износа стали 45 от пути трения для случаев испытаний в среде модифицированной и немодифицированной смазки. Вместе с тем следует отметить, что при испытаниях смазки с добавками УДАГ интенсивность изнашивания стали 45 после пути трения 2500 м резко падает. На этой же стадии испытаний регистрируется и существенное снижение значений коэффициента трения ($f_o = 0,06...0,065$). В немодифицированной смазке И-20А интенсивность изнашивания стали 45 на протяжении испытаний сохраняется на высоком уровне, а значения коэффициента трения на поздних стадиях испытаний даже возрастают и достигают уровня $f_o = 0,11...0,115$.

В случае испытаний с контактным давлением 30 МПа модифицирование смазки УДАГ приводит к существенному снижению интенсивности изнашивания стали, а значения коэффициента трения уменьшаются до уровня 0,06...0,065 в начале испытаний. Фрикционные испытания в среде немодифицированной смазки с высокими контактными давлениями сопровождаются быстрой интенсификацией процессов изнашивания и увеличением значений коэффициента трения до уровня 0,12...0,13 уже на самых ранних стадиях испытаний.

Результаты испытаний показывают, что добавление УДАГ в смазку И-20А интенсифицирует процесс приработки фрикционного сопряжения. При испытаниях в области высоких контактных давлений добавление УДАГ существенно уменьшает интенсивность изнашивания и эффективно снижает коэффициент трения трибопары.

Одна из возможных причин указанного эффекта - упрочнение поверхностных слоев отожженной стали 45 за счет формирования в них дислокационных субструктур и модифицирования частицами ультрадисперсных алмазов в процессе фрикционного взаимодействия. С целью проверки указанного предположения в работе проведены дополнительные триботехнические испытания с немодифицированной смазкой И-20А образцов стали 45, прошедших предварительную приработку в среде модифицированной смазки. Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют о сохранении высокой износостойкости и низкого коэффициента трения у образцов стали 45, подвергнутых предварительной приработке в среде модифицированной УДАГ смазки И-20А (рис. 2).

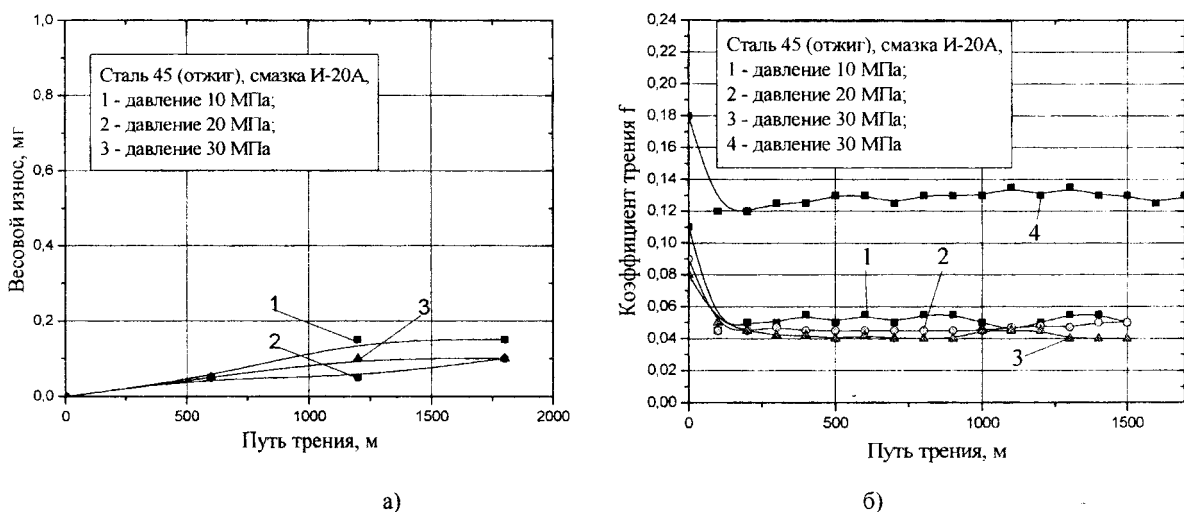


Рис. 2. Зависимость весового износа (а) коэффициента трения (б) отожженной стали 45 от пути трения после приработки со смазкой И-20А, модифицированной УДАГ, при различных давлениях испытаний (кривая 4 – зависимость коэффициента трения от пути трения для немодифицированной смазки И-20А)

В процессе триботехнических испытаний со смазкой И-20А поверхность отожженной стали выглаживается и приобретает зеркальный блеск (рис. 3, а). При большом увеличении на поверхности трения образцов отожженной стали, прошедших испытания с модифицированной УДА смазкой И-20А, обнаруживаются заглаженные пластифицированные участки (рис. 3, б).

Из представленных в таблице данных видно, что в результате испытаний сильно возрастает микротвердость поверхностного слоя отожженной стали (примерно в 2 раза). Наряду с этим, результаты структурных исследований свидетельствуют о существенном увеличении плотности дефектов в поверхностных слоях стали в результате ее интенсивной пластической деформации в процессе фрикционного взаимодействия. В частности, величина отношения физических уширений дифракционных линий матричной α -фазы β_{220}/β_{110} составляет 1,5...1,8, что достаточно близко к величине отношения $sec_{220}/sec_{110} = 1,9$. Указанная величина соотношения β_{220}/β_{110} свидетельствует о формировании в поверхностных слоях трения разориентированных дислокационных субструктур, характеризующихся скоррелированным расположением дислокаций в виде стенок, состоящих из эквидистантно расположенных дислокаций одного знака [7], при этом области внутри стенок мало искажены (практически не содержат дислокаций). Такая структура характерна для разориентированных ячеек, блоков или субзерен, а величина физического уширения обратно пропорциональна размерам блоков D [9]. Образование субзеренной структуры приводит к существенному увеличению твердости поверхностей трения.

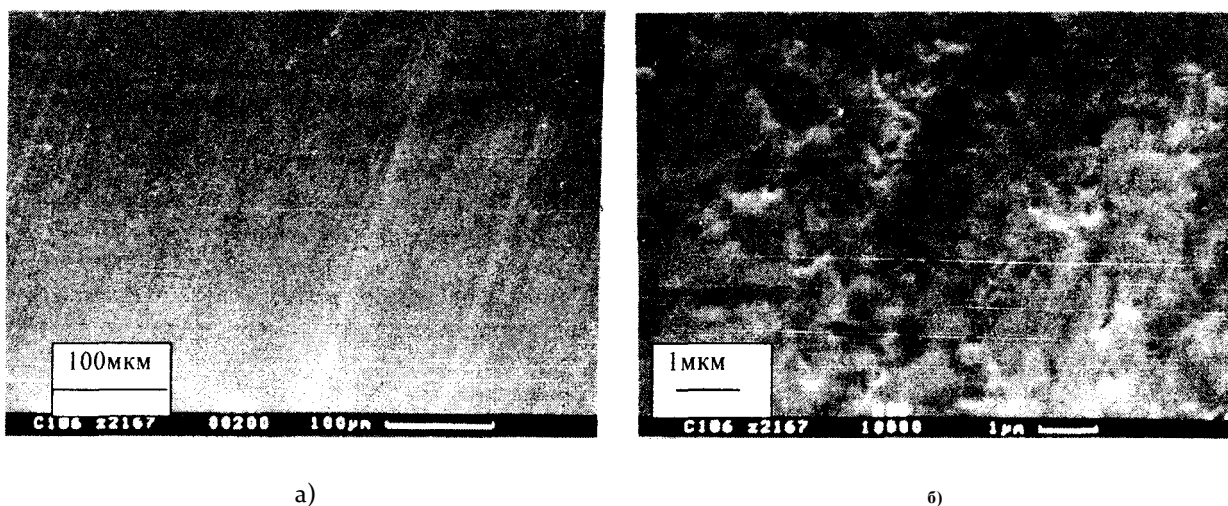


Рис. 3. Микроструктуры поверхности трения отожженной стали 45

(трение со смазкой И-20А, модифицированной УДАГ; давление 10 МПа; контртело - закаленная сталь 60Г)

Значения микротвердости H_p и структурных параметров отожженной стали 45 после различных режимов триботехнических испытаний

Материал	Режим испытаний	H_p , МПа	β_{110} , 10^{-3} рад	β_{220} , 10^{-3} рад	β_{220}/β_{110}	D , мкм
Сталь 45 (отжиг)	10 МПа И-20А	2350	1,9	2,9	1,6	0,13
	10 МПа И-20А + УДАГ	2700	2,3	3,8	1,7	0,10
	20 МПа И-20А	2500	2,2	3,2	1,5	0,12
	20 МПа И-20А + УДАГ	2950	2,5	4,0	1,6	0,09
	30 МПа И-20А	2700	2,3	4,1	1,8	0,09
	30 МПа И-20А + УДАГ	3300	3,3	6,0	1,8	0,06

Сопоставляя данные по структурным параметрам поверхностей трения стали после испытаний с модифицированной и немодифицированной смазкой И-20А, можно сказать, что присутствие в смазке добавок УДАГ приводит к существенному увеличению физического уширения дифракционных линий матричной α -фазы. Последнее свидетельствует о том, что в процессе трения с модифицированной УДАГ смазкой в тонких поверхностных слоях стали 45 формируется ультрадисперсная субзеренная структура,

характеризуемая существенно меньшим размером блоков D , по сравнению со случаем испытаний в среде немодифицированной смазки. Фактически в процессе испытаний со смазкой, модифицированной УДАГ, в поверхностном слое формируется наноразмерная субструктура, характеризующаяся размером субзерен ≤ 100 нм. С увеличением давления регистрируемые величины p возрастают, и увеличивается различие в их значениях для случаев модифицированной и немодифицированной смазки И-20А.

Измельчение формирующейся при трении субзеренной структуры, характеризующееся размером блоков D , сопровождается пропорциональным увеличением микротвердости поверхности трения (см. таблицу). В частности, в результате триботехнических испытаний при давлении 30 МПа, микротвердость поверхностного слоя возрастает примерно в 2 раза.

Образование в поверхностях трения наноразмерной субзеренной структуры вследствие присущих ей чрезвычайно высоких пластических свойств обеспечивает эффективное поглощение энергии фрикционного взаимодействия при трении и облегчает приработку контактирующего сопряжения. Кроме этого, такие структуры характеризуются высоким сопротивлением зарождению и распространению микротрещин [10], формирующих частицы износа. С другой стороны, интенсивное деформационное упрочнение наноразмерной субзеренной структуры обуславливает высокую несущую способность фрикционного сопряжения. Можно полагать, что эффективное измельчение формирующейся в поверхностях трения субзеренной структуры при использовании смазки, модифицированной УДАГ, ответственно за повышенные триботехнические свойства таких фрикционных сопряжений.

Проведенные металлографические и дюрOMETрические исследования поверхностей трения образцов отожженной и закаленной стали 45 после триботехнических испытаний в широком диапазоне контактных давлений со стандартной смазкой И-20А и со смазкой И-20А, модифицированной добавками ультрадисперсной алмазографитовой шихты, показали, что при работе в области давлений 10...20 МПа модифицирование жидкой смазки добавками УДАГ приводит к снижению шероховатости поверхности трения и увеличению ее микротвердости вне зависимости от исходного состояния образцов стали 45. В частности, при 20 МПа для отожженной стали 45 микротвердость H_{II} возрастает с 2500 до 2900 МПа, а для закаленной стали 45 - с 6700 до 7000 МПа.

Триботехнические испытания с высокими контактными давлениями ($p_a = 30$ МПа) указывают на зависимость эффективности модифицирования смазки от исходной твердости поверхности трения и противоположное действие добавок УДАГ на топографию поверхности трения для отожженных и закаленных образцов стали 45. В частности, добавки УДАГ интенсифицируют процессы микроразрушения образцов закаленной стали при фрикционном взаимодействии вследствие их пониженной трещиностойкости и способствуют образованию на поверхности трения областей интенсивного изнашивания. Для отожженной стали 45 модифицирование смазки И-20А добавками УДАГ обеспечивает формирование выглаженной поверхности трения с повышенным уровнем микротвердости и ультрадисперсной субзеренной структурой, обладающей повышенным сопротивлением микроразрушению при трении.

Выводы. Проведенные исследования влияния температурных режимов на триботехнические свойства жидких смазок показали, что модифицирование жидких смазок добавками ультрадисперсной алмазографитовой шихты позволяет, во-первых, стабилизировать в определенных пределах значения коэффициента трения при повышении температуры смазки, во-вторых, поднять на 20...30 % верхний предел рабочих температур для модифицированных масел.

Установлено, что в условиях граничного трения для материалов твердостью HV 1700...1800 МПа модифицирование жидкой смазки добавками ультрадисперсной алмазографитовой шихты наиболее эффективно при давлениях свыше 20 МПа. При этом модифицированную смазку достаточно применять только на стадии приработки, поскольку использование после подобной приработки немодифицированной смазки обеспечивает достаточно низкий коэффициент трения ($f_A = 0,04...0,05$) при практическом отсутствии износа.

В процессе триботехнических испытаний пар трения «пластичный материал - закаленная сталь» со смазкой, модифицированной алмазографитовой шихтой УДАГ, установлено, что в поверхностном слое пластичных материалов (отожженная сталь) в процессе трения формируется наноразмерная субзеренная структура, характеризующаяся уменьшением размера субзерен до уровня ≤ 100 нм и повышением микротвердости поверхностных слоев на 30...40 %.

Триботехнические испытания с высокими контактными давлениями указывают на зависимость эффективности модифицирования смазки от исходной твердости поверхности трения. Сделано предположение, что присутствие в смазке сверхтвердых частиц ультрадисперсных алмазов может инициировать зарождение и распространение микротрещин в высокопрочных материалах, характеризующихся пониженной трещиностойкостью.

В случае трибопар с пластичными материалами присутствие в смазке ультрадисперсных алмазов приводит к формированию в поверхностном слое контактирующих материалов наноразмерной ячеистой субструктуры, обладающей повышенным сопротивлением зарождению и распространению микротрещин и эффективно поглощающей энергию фрикционного взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сакович Г.В., Брыляков В.М., Губаревич В.Д. Получение композиционных кластеров взрывом и их практическое использование // Журн. Всес. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. - 1996. - Т. 35, № 5. - С. 600 - 602.
2. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. - М.: Химия, 2000. - 672 с.
3. Витязь П.А., Голубцова Е.С., Гречихин Л.И. Нанокерамические конструкционные материалы. Свойства и физика их формирования // Физическая мезомеханика. - 2004,- Т. 7, № 5. - С. 89 - 94.
4. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Получение, свойства, применение. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. - 343 с.
5. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами / М. Люты, Г.А. Костюкович, А.А. Скаскевич и др. // Трение и износ. - 2002. - Т. 23, № 4. - С. 411 - 424.
6. Триботехнические свойства смазки, содержащей политетрафторэтилен и ультрадисперсные алмазы / М.Г. Иванов, В.В. Харламов, В.М. Бузник и др. // Трение и износ. - 2004. - Т. 25, № 1. - С. 99 - 103.
7. Влияние фуллеренов на формирование структуры поверхности трения оксидокерамических покрытий / П.А. Витязь, Э.М. Шпилевский, В.И. Комарова и др. // Фуллерены и фуллереноподобные структуры в конденсированных средах: III междунар. симпозиум, Минск, 22 - 25 июня 2004 г. / Ред. кол. П.А. Витязь и др. - Мн.: ИТМО НАН Беларуси, 2004. - С. 6 - 8.
8. Тэйлор А. Рентгеновская металлография. - М.: Металлургия, 1965. - 410 с.
9. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986. - 224 с.
10. Хеллан К. Введение в механику разрушения. - М.: Мир, 1988. - 364 с.