

05.161

~~Б 89~~

2

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Инженер А. И. БРУДНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И
СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА
ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ

Специальность 05.161

"Машиноведение и детали машин"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

1970

ЧПИ

621.891

Читальный зал
«Профессорский»

Работа выполнена на кафедре "Детали машин и ПМ"
Челябинского политехнического института им. Ленинского
комсомола.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент Кармадонов А. Ф.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Бургвиц А. Г.;

и кандидат технических наук, доцент Леванидов В. В.

Коллективный оппонент – Челябинский ордена Трудового
Красного Знамени металлургический завод.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интере-
сующихся темой диссертации, принять участие в заседании
Совета по присуждению ученых степеней при МГ и АТ факуль-
тетах Челябинского политехнического института им. Ленин-
ского комсомола или прислать отзыв. (Отзыв присылается
в 2 экземплярах, заверенных печатью).

Защита диссертации состоится 17 июня 1970 года.

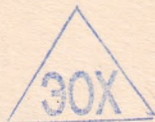
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
института.

Адрес института: г. Челябинск, 44, проспект имени
В. И. Ленина, 76. Телефон 39-39-64.

Автореферат разослан _____ мая 1970 года.

Ученый секретарь Совета
доцент, кандидат технических наук

Графиня (С. Ф. ХАРИН)



Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Инженер А. И. БРУДНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И
СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА
ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ

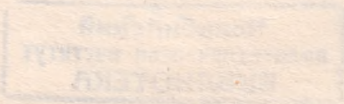
Специальность 05.161

"Машиноведение и детали машин"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

758781

Челябинск
1970



Работа выполнена на кафедре "Детали машин и ПГМ" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент Кармадонов А.Ф.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Бургвиц А.Г.;
кандидат технических наук, доцент Леванидов В.В.

Коллективный оппонент - Челябинский ордена Трудового Красного Знамени металлургический завод.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета по присуждению ученых степеней при МТ и АТ факультетах Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола или прислать отзыв. (Отзыв присылается в 2 экземплярах, заверенных печатью).

Защита диссертации состоится 17 июня 1970 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Адрес института: г. Челябинск, 44, проспект имени В.И. Ленина, 76. Телефон 39-39-64.

Автореферат разослан _____ мая 1970 года.

Ученый секретарь Совета
доцент, кандидат технических наук *Графин* (С.Ф.ХАРИН)

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

Развитие современной техники в направлении интенсификации рабочих режимов машин и механизмов приводит к необходимости обеспечения и повышения надежности узлов трения, способных работать в различных условиях. Известные смазочные материалы в определенных условиях оказываются неработоспособными или малоэффективными. Не случайно поэтому поиски и исследования новых смазок, способных улучшить смазочные свойства, или в какой-то мере заменить обычные смазки.

В последние годы большое внимание уделяют твердым смазкам, в частности, дисперсным порошкам различных минералов со слоистой структурой. При применении твердых смазок возникают новые проблемы по определению условий их эффективного использования, что вызывает необходимость тщательного и подробного изучения их свойств и механизма смазочного действия.

Среди твердых слоистых смазочных материалов весьма перспективным оказался дисульфид молибдена. Однако природа смазочной способности дисульфида молибдена до настоящего времени еще полностью не выяснена. Объясняется это недостаточной изученностью ряда его свойств и сложностью явлений, протекающих при трении.

Целью проведенных в настоящей работе исследований ставилось изучение смазочной способности дисульфида молибдена при граничном трении скольжения.

В связи с этим в работе решались следующие задачи:

- 1) Экспериментально определить физико-механические свойства дисульфида молибдена;
- 2) Изучить условия, влияющие на образование смазочной дисульфидмолибденовой пленки;
- 3) Изучить структуру смазочной пленки;
- 4) Изучить физико-механические свойства смазочной пленки и фрикционный контакт при смазке дисульфидом молибдена;
- 5) Определить смазочную способность дисульфида молибдена теоретически по коэффициенту трения и

подтвердить её данными лабораторных исследований. На основе лабораторных и производственных испытаний дать рекомендации по практическому применению дисульфида молибдена.

Работа состоит из пяти глав.

В первой главе диссертации на основании литературного материала приводятся результаты предыдущих исследований физико-химических и антифрикционных свойств твердых смазок, дается анализ состояния исследований свойств дисульфида молибдена и формулируются задачи исследований. Приводится классификация и дается характеристика твердых смазочных материалов. На основании сопоставления антифрикционных свойств смазок установлено, что во многих случаях наиболее эффективными могут быть твердые слоистые вещества. Описывается структура и свойства твердых неорганических слоистых веществ, среди которых особое внимание уделено графиту и дисульфиду молибдена. По приведенным результатам исследований антифрикционных свойств графита и дисульфида молибдена устанавливается их определенное сходство и различие.

Рассматриваются теории, пытающиеся объяснить механизм смазочного действия твердых смазок: 1) структурная теория Брэгга, 2) адсорбционная теория Сейвиджа, 3) теория контактной смазки Брейтуэйта, 4) теория химического взаимодействия твердой смазки с металлической поверхностью (Л.А. Майорова, Кнапфост, Григуш и другие).

До сих пор не имеется единого мнения о механизме смазочного действия дисульфида молибдена, вследствие недостаточной его изученности.

Во второй главе рассматривается кристаллическая структура дисульфида молибдена, излагается методика и результаты экспериментального определения его физико-механических свойств, которые оказывают существенное влияние на процесс трения.

Дисульфид молибдена (химическая формула $-MoS_2$) имеет гексагональную кристаллическую решетку с параметрами элементарной ячейки $a = 3,15 \text{ \AA}$, $c = 12,32 \text{ \AA}$.

Встречается в природе ромбоэдрическая модификация MoS_2 , которая вследствие особенностей структуры для смазочных целей не применяется и в дальнейшем не рассматривается.

Проведенный анализ показал, что химические связи в кристаллической решетке MoS_2 обладают значительной анизотропией, что обуславливает различие физико-механических свойств в кристалле MoS_2 по разным кристаллографическим направлениям.

Наиболее отчетливо анизотропия свойств выражена по направлениям, перпендикулярным плоскостям (001) и (100), по которым проводилось определение микротвердости и поверхностной энергии, что использовалось для объяснения механизма смазочного действия

Микротвердость MoS_2 определяли методом вдавливания алмазного индентора и царапания. Последний способ сводится к получению на каком-либо материале царапины от испытуемого материала (сравнительная твердость) или же к получению царапины на испытуемом материале алмазным наконечником (склерометрическая твердость). Исследование микротвердости MoS_2 проводилось на монокристаллических и поликристаллических образцах.

Для определения микротвердости монокристалла дисульфида молибдена вырезали образцы из кускового (штучного) молибденита отечественного месторождения. Ориентировка кристалла проводилась на рентгеновском дифрактометре УРС-50ИМ со стандартной приставкой. Грань (001) MoS_2 получали расщеплением по плоскости спайности. Грань (100) MoS_2 получали элировкой монокристалла на чугунном притире. Затем доводили на фетровом круге, протравливали смесью кислот, промывали дистиллированной водой и просушивали.

Поликристаллические образцы MoS_2 изготавливали прессованием из порошка дисульфида молибдена марки МВЧ-1. Образцы получали в виде роликов с размерами: наружный диаметр 26 мм, внутренний диаметр 16 мм, ширина 10 мм.

Микротвердость MoS_2 определяли методом вдавливания

на микротвердомере ПМТ-3 по известной методике. Для получения достоверных значений микротвердости MoS_2 использовался метод нахождения наиболее вероятных значений путем построения вариационных кривых. Для грани (100) монокристалла MoS_2 получены значения 12-19 кг/мм², для грани (001) MoS_2 - 21-32 кг/мм².

Однако на основании анизотропии химических связей в структуре MoS_2 следовало ожидать обратного: микротвердость грани (100) MoS_2 должна существенно превышать микротвердость грани (001) MoS_2 . Такое расхождение в работе анализируется и показано, что причиной этого является особенность механизма образования отпечатка индентора на грани (100) монокристалла MoS_2 . Микротвердость поликристалла MoS_2 оказалась в интервале 25-40 кг/мм².

Аналогичные результаты для обеих граней монокристалла MoS_2 были получены склерометрическим методом. Полярность анизотропии выражена незначительно.

Царапающая способность MoS_2 определялась при скольжении ролика поликристаллического MoS_2 по неподвижной металлической поверхности на машине трения МИ-1М. Неподвижными образцами служили ролики или пластины из различных материалов, рабочая поверхность которых обрабатывалась электрополированием.

Максимальная микротвердость кристаллитов MoS_2 приравнивалась к микротвердости той сопряженной поверхности, на которой в ходе испытаний царапин не обнаружено (по М. М. Хрущову). Это значение микротвердости оказалось равным 900 кг/мм². На основании рассмотрения кристаллической структуры MoS_2 установлено, что такое высокое значение микротвердости может быть характерно только для грани (100) кристаллита MoS_2 .

Таким образом, единичный кристаллит MoS_2 , являющийся частицей смазочного вещества, представляет собой анизотропное твердое тело со значительной степенью анизотропии. Это свойство проявляется в том, что микротвер-

дость грани (001) кристаллита MoS_2 равна 32 кг/мм², а грани (100) кристаллита MoS_2 - близка к значению 900 кг/мм². Такая анизотропия свойств является весьма существенной в процессе образования смазочной пленки и при трении.

Высокая степень анизотропии микротвердости подтверждена значениями поверхностных энергий граней (100) и (001) кристаллитов MoS_2 . Поверхностная энергия граней кристаллитов MoS_2 определялась при помощи метода абразивного разрушения, предложенным В.Д. Кузнецовым.

Для определения работы, затрачиваемой на разрушение каждой грани монокристалла MoS_2 , была изготовлена специальная приставка к машине трения МИ-1М. Разрушающим элементом служила абразивная лента типа 00, длиной 10 м. Скорость протягивания равнялась 5 см/сек. Разрушающее усилие измерялось чувствительным пружинным динамометром. Нагрузка на образец равнялась 500 граммам. Опыты проводили в нормальных условиях (комнатная температура, воздушная среда), в водной среде и в масле.

Эксперимент показал, что при одинаковых условиях разрушения обеих граней монокристалла MoS_2 степень их износа различна.

Определив форму, размер, и внешнюю поверхность кристаллитов, образующихся при разрушении каждой грани, оказалось возможным получить выражения для определения величины поверхностной энергии:

для грани (001) -

$$\sigma_1 = \frac{F \cdot 10^{-4} \cdot l \cdot \rho}{24 \cdot \alpha \cdot M_1}$$

для грани (100) -

$$\sigma_2 = \frac{3F_2 \cdot 10^{-4} \cdot l \cdot \rho}{2 \cdot \psi \cdot M_2}$$

где F - сила трения в г;

l - путь трения в см;

ρ - плотность в г/см³;

M - масса изношенного материала (мг);

α, ψ - коэффициенты формы кристаллов.

Определено, что поверхностная энергия по грани (001) MoS_2 равна 24 эрг/см², по грани (100) MoS_2 - 700 эрг/см².

Внешняя среда (вода, масло) уменьшает поверхностную энергию только по грани (100) MoS_2 (в воде $\sigma_2 = 135$ эрг/см²) и не влияет на значение поверхностной энергии по грани (001) MoS_2 , что является весьма важным при трении. Поскольку (по П.А.Ребиндеру) микротвердость граней пропорциональна поверхностной энергии, полученные значения σ_1 и σ_2 для MoS_2 подтверждают значительную анизотропию микротвердости дисульфида молибдена.

В конце главы приведены данные по дисперсности различных порошков дисульфида молибдена, определенные седиментационным анализом и методом воздушной проницаемости; первый способ устанавливает распределение кристаллитов по размерам, второй позволяет оценить средний размер кристаллитов MoS_2 .

В третьей главе изложены результаты исследования явлений, связанных с образованием дисульфидмолибденовой пленки на металлических поверхностях, и анализируется возможная структура смазочной пленки.

Исследовалось влияние различных факторов на образование смазочной пленки MoS_2 : микрогеометрии и твердости металлической поверхности, степени очистки поверхностей от загрязнений, давления в контакте и скорости скольжения сопряженных поверхностей.

Исследования проводились на машине МИ-1М. Образцы изготавливались из различных материалов (медь, бронза, чугун, сталь). Микрогеометрия поверхности для каждого вида испытаний была различной, класс чистоты поверхности определяли на микропрофилометре М-201. Дисульфид молибдена (МВЧ-1) наносился в виде спиртовой суспензии (соотношение MoS_2 и спирта принято 1:1).

Влияние различных факторов на образование смазочной пленки MoS_2 оценивалось по времени установления минимального момента трения.

Исследования показали, что при образовании смазочной пленки MoS_2 оптимальной является микрогеометрия поверхности, соответствующая 6-7 классу чистоты (по

ГОСТ 2789-59) при перекрестном или перпендикулярном направлении микронеровностей к направлению скорости скольжения. С уменьшением твердости металлической подложки время на образование смазочной пленки MoS_2 уменьшается. На стальных поверхностях с твердостью более 800 кг/мм² пленка MoS_2 не образуется.

Степень очистки металлических поверхностей является важной характеристикой, обуславливающей возможность образования граничной смазочной пленки MoS_2 . Оказалось, что при наличии на поверхности влаги и масла, пленка MoS_2 не образуется. Среди исследованных способов очистки достаточно эффективными оказались обезжиривание и абразивная зачистка поверхности.

Оптимальными в начальный период трения при смазке MoS_2 являются скорости скольжения до 2 м/сек. Высокие контактные нагрузки способствуют ускорению процесса образования смазочной пленки MoS_2 .

Таким образом, время образования смазочной пленки MoS_2 зависит от микрогеометрии металлической поверхности, её механических свойств и нагрузочной характеристики контакта.

Исследуя долговечность твердопленочных покрытий, Сентюрихина Л.Н. и Опарина Е.И. обнаружили, что минимальный момент трения устанавливается не сразу после начала скольжения, а после определенного периода времени. Этот период они назвали временем приработки. Для изучения явлений, происходящих с массой кристаллитов MoS_2 на скользящем контакте в период приработки, были проведены специальные исследования.

Исследования проводились на дисульфиде молибдена марки МВЧ-1 и медных образцах. Чистота рабочей поверхности образцов соответствовала ∇_7 (по ГОСТ 2789-59). Дисульфид молибдена наносили в составе спиртовой суспензии. Образование смазочной пленки происходило при трении на машине ММ-1М, нагрузка на образцы составляла 50 кг,

скорость относительного скольжения $\sim 0,3$ м/сек.

Поверхностные слои, образованные на медных образцах, исследовались с помощью специальной приставки к аппарату - УРС-50ИМ, позволяющей поворачивать образцы в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, с тем, чтобы получить отражения рентгеновских лучей от любого места на рабочей поверхности образцов и под любым углом между направлением рентгеновского пучка и осью вращения образца. Все это обеспечивало получение средней картины изменений в объеме поверхностного слоя, облучаемого рентгеновскими лучами. Облучаемая площадь 10 мм^2 (ширина луча 10 мм , длина $- 1 \text{ мм}$). При такой малой длине облучаемой зоны кривизна поверхности не играет существенной роли.

Изучение происходящих на поверхности трения изменений проводили по рентгенограммам. На рентгенограммах всех образцов обнаруживаются две системы линий: MoS_2 гексагональной модификации и меди. В процессе образования смазочной пленки происходят изменения дифракционной картины от MoS_2 : интенсивность интерференций типа (001хп) возрастает, интенсивность всех других уменьшается, так что целый ряд линий интерференций относящихся к MoS_2 исчезает. Аналогичное явление наблюдается на рентгенограммах, снятых с порошка MoS_2 при уплотнении его в кювете: образец с матовой поверхностью дает все линии, характерные для гексагонального MoS_2 , на образце с зеркальной поверхностью остаются в основном лишь линии типа (001 х п) . Это свидетельствует, о том, что изменения в порошке MoS_2 при уплотнении его в кювете и в образцах при образовании смазочной пленки носят один и тот же характер.

Указанные выше изменения интерференционной картины от MoS_2 показывают, что в процессе образования смазочной пленки при трении происходят изменения в пространственном расположении кристаллитов относительно друг друга и подложки. Возможно, что в процессе начального трения должна устанавливаться вполне определенная ориентация

кристаллитов MoS_2 , т.е. образовываться текстура.*

На основании рентгеноструктурного анализа установлено, что в смазочной пленке определенная часть кристаллитов MoS_2 располагается плоскостью (001) параллельно поверхности скольжения. В связи с этим в работе предлагается характеризовать степень упорядоченности кристаллитов MoS_2 отношением числа кристаллитов, расположенных перпендикулярно плоскостью (001) к плоскости скольжения образца к числу кристаллитов, у которых плоскости типа (001) параллельны плоскости скольжения (в одном и том же поверхностном объеме образца). Эта величина пропорциональна отношению интенсивностей соответствующих интерференций. Для количественной оценки степени ориентации кристаллитов в смазочной пленке получено соотношение:

$$C = 0,12 \frac{I_1}{I_2},$$

где I_1 - интенсивность интерференции (100) MoS_2 ;

I_2 - интенсивность интерференции (004) MoS_2 ;

Коэффициент текстуры для смазочной пленки MoS_2 оказался равным 0,10 ± 0,12. Аксиальная текстура в смазочной пленке MoS_2 не обнаружена, т.е. текстура пленки не связана с направлением скольжения.

Поскольку коэффициент текстуры ни для одного образца не был близким к нулю, то, следовательно, не все кристаллиты MoS_2 в объеме смазочной пленки имеют одинаковую ориентацию.

Составление данных рентгеноструктурного анализа и измерение коэффициента отражения поверхности смазочной пленки позволяет заключить, что текстура смазочной пленки MoS_2 только поверхностная, а масса кристаллитов, находящаяся между текстурированным слоем и металлической подложкой, лишь частично ориентирована.

Толщину текстурированного слоя в смазочной пленке определяли на прессованных поликристаллических образцах MoS_2 , полученных из порошков различной дисперсности. Давление прессования выбиралось в диапазоне от x -под текстурой понимается преимущественная ориентация кристаллитов в поликристаллическом образце.

125 кг/см² до 12500 кг/см². Трение образцов по рабочей поверхности (Ф 36 мм) осуществлялось на машине МИ-1М со скоростью 0,1 м/сек, нагрузка равнялась 5 кг.

Исследования поликристаллических образцов показали, что коэффициент текстуры зависит от дисперсности прессуемых порошков MoS_2 и толщина текстурированного слоя равна среднему размеру кристаллитов MoS_2 в порошок. Следовательно, совершенной текстурой обладает слой смазочной пленки MoS_2 толщиной в одиничный кристаллит.

Толщина смазочной пленки MoS_2 на медных образцах определялась по поглощению рентгеновских лучей по формуле:

$$x_0 = -6,48 \ln \frac{I}{I_0} \text{ мк}$$

где I - интенсивность рентгеновских лучей, прошедших через смазочную пленку после отражения от подложки,

I_0 - интенсивность рентгеновских лучей, отраженных от чистой подложки.

Толщина пленки MoS_2 , полученной из порошка МВЧ-1, оказалось равной 2-5 микрон.

Учет взаимодействия различным образом ориентированных кристаллитов MoS_2 между собой и подложкой позволил установить, что распределение связей между кристаллитами MoS_2 по толщине пленки обеспечивает, вследствие её структуры, выполнение правила положительного градиента механических свойств ($\frac{dT}{dh} > 0$), являющегося условием её прочности.

В процессе трения двух взаимно контактирующих поверхностей постоянно возникает и разрушаются фрикционные связи между кристаллитами MoS_2 по плоскостям (001) с низкими физико-механическими свойствами. Величина этих связей почти в 20 раз слабее самых малых сил взаимодействия внутри смазочной пленки, что обеспечивает слабое сопротивление разрушению фрикционных связей, а значит, и малое сопротивление сдвигу.

Четвертая глава содержит анализ фрикционного

контакта. Дается определение смазочной способности дисульфида молибдена по коэффициенту трения в различные периоды трения. Особенностью предлагаемой оценки является включение в нее свойств металлических поверхностей. Приводятся результаты лабораторных испытаний. На основе рассмотренных видов нарушения фрикционных связей (по И. В. Крагельскому) установлено, что при смазке дисульфидом молибдена происходит изменение в характеристике фрикционного контакта: от пластического деформирования к трению поверхностей, разделенных смазочной пленкой MoS_2 .

Тот или иной вид нарушения фрикционных связей зависит как от геометрии контактирования (формы выступов микронеровностей и глубины внедрения) так и от свойств материала: предела текучести, модуля упругости, величины адгезии.

Изучалась микрогеометрия смазочной пленки MoS_2 для определения параметров кривой опорной поверхности (ζ, ϑ), которые входят в расчетные уравнения коэффициента трения. На профилометре М-201 с поверхности дисульфидмолибденовой пленки снимались продольные (вдоль скорости скольжения) и поперечные профилограммы. Базовая длина профилограмм устанавливалась по ГОСТ 2789-59. Построение кривой опорной поверхности, учитывающей поперечную и продольную шероховатость, проводили по методике Н. Б. Демкина. По опорной кривой найдены её параметры; $\zeta = 1,3$, $\vartheta = 1,5$. По поперечным профилограммам определена максимальная высота микровыступа $h_{max} = 0,2$ микрона. Учитывая различие вертикального и горизонтального масштабов, по продольным и поперечным профилограммам определено расчетное значение радиуса кривизны единичного микровыступа, равное $R = 170$ микрон.

Характер нарушения фрикционных связей зависит не только от микрогеометрии, но и от механических свойств материала контакта. По работам Бойда и Робертсона, Карпа, Таилера и Лу, В. И. Зайнштейн можно принять для

MoS_2 в поликристаллическом состоянии предел текучести равным 1 кг/мм^2 , а модуль упругости - $8 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$.

Среди механических свойств материала, определяющих свойства трения при контакте, необходимо знать величину адгезии. Эта величина в значительной мере определяется сопротивлением срезу материала контакта. Воспользовавшись результатами работы Бойда и Робертсона, (они определяли срезающие напряжения при сдвиге для ряда смазочных материалов, в том числе и для MoS_2 , при контактных давлениях до 35000 кг/см^2) был построен график, из которого определены значения $\tau_0 = 1,4 \text{ кг/мм}^2$ (сопротивление срезу при отсутствии нормального давления) и $\beta = 0,023$ (псевдокоэффициент, показывающий увеличение сопротивления на сдвиг в зависимости от контактного давления).

Основываясь на физико-механических свойствах пленки MoS_2 , определяется предельная нагрузка, которую может выдержать трение при контакте. Для этого получена формула:

$$q = 3,2 \sigma_s \left[\frac{R}{R_{max}} \left(0,54 - \frac{2,8}{\sigma_s} \right) \right]^{1,5}$$

в которой $\frac{R}{R_{max}}$ для пленки MoS_2 равняется 850. Порог внешнего трения при смазке MoS_2 лежит в области контактных давлений, превышающих предел текучести материала основы (σ_s).

Ранее указывалось, что в начальный период трения происходит переориентация кристаллитов MoS_2 . Кроме того, создается в этот период новая микрогеометрия трения при контакте, которая целиком определяется микрогеометрией поверхности смазочной пленки. Изменение микрогеометрии трения при контакте изменяет величину относительного внедрения. На переход одного вида нарушения трения при контакте к другому влияют два фактора: глубина относительного внедрения и относительная прочность адгезионной связи, выраженная в долях от предела текучести основного деформируемого материала. Поскольку в данном случае, последняя величина значительного изменения не претерпевает, решающей в определении вида на-

рушения фрикционных связей является величина относительного внедрения.

При граничном трении коэффициент трения зависит от нагрузки в контакте и микрогеометрии поверхности. Причем, эти зависимости совершенно различны в случае пластического и упругого контакта. Поэтому, для оценки смазочной способности MoS_2 определялась область контактирования в различные периоды трения.

Учитывая величину внедрения, соответствующую переходу от упругого контакта к пластическому (по И.В. Крагельскому), получены выражения для критического контурного давления, соответствующего этому переходу: для поверхностей, обработанных точением -

$$q_c = 1,2 \cdot 10^6 \frac{G_s^5 \left(\frac{R}{r_{max}} \right)^2}{E^4},$$

для поверхностей, обработанных шлифованием -

$$q_c = 5,7 \cdot 10^8 \frac{G_s^7 \left(\frac{R}{r_{max}} \right)^3}{E^6}$$

Для фрикционного контакта со смазочной дисульфид-молибденовой пленкой с учетом характеристики кривой опорной поверхности, критическое контурное давление равно:

$$q_c = 3,3 \cdot 10^4 \frac{G_s^4 \left(\frac{R}{r_{max}} \right)^{1,5}}{E^3}$$

Если контактное давление больше определенного по приведенным выше формулам, то будет иметь место пластический контакт, если меньше - упругий.

Сопоставление расчетных критических контурных давлений с действительными, с учетом микрогеометрии поверхности множества реальных деталей трения показало, что в начальный период трения имеет место пластический контакт; появление смазочной пленки MoS_2 на металлической поверхности при том же контактном давлении в результате изменения микрогеометрии поверхности (а, следовательно и $\frac{R}{r_{max}}$) переводит фрикционный контакт из пластической области в упругую. Микрогеометрия смазочной пленки и малая величина относительного внедрения обеспечивают

высокую несущую способность фрикционному контакту.

Наиболее показательным в оценке смазочной способности следует считать коэффициент трения. Значение этой величины в каждом реальном случае, согласно молекулярно-механической теории трения, в наиболее полной мере учитывает характеристику фрикционного контакта. Приводится критический анализ некоторых работ отечественных и зарубежных авторов по оценке смазочной способности MoS_2 . Отмечено существование различных точек зрения.

Коэффициент трения при смазке MoS_2 принято оценивать как функцию глубины относительного внедрения и адгезии (по И. В. Крагельскому, Н. М. Михину). Проведя соответствующие преобразования, получены выражения коэффициента трения при смазке MoS_2 при пластическом контакте:

для поверхностей, обработанных точением —

$$f = \frac{\tau_0}{c\sigma_s} + 0,91\beta + 0,364 \left(\frac{h_{max}}{R} \right)^{1/2} \left(\frac{q_c}{c\sigma_s} \right)^{1/4},$$

для поверхностей, обработанных шлифованием —

$$f = \frac{\tau_0}{c\sigma_s} + 0,91\beta + 0,336 \left(\frac{h_{max}}{R} \right)^{1/2} \left(\frac{q_c}{c\sigma_s} \right)^{1/6}$$

Эти выражения преобразованы для случая контактирования стальных поверхностей:

$$f = 0,024 + 0,123 \left(\frac{h_{max}}{R} \right)^{1/2} q_c^{1/6},$$

для медных поверхностей:

$$f = 0,044 + 0,13 \left(\frac{h_{max}}{R} \right)^{1/2} q_c^{1/4}$$

Сила внешнего трения при пластическом контакте обусловлена деформированием тонкого поверхностного слоя и преодолением адгезионных связей в точках фактического контакта. Приведенные формулы учитывают оба вида сопротивления скольжения через адгезионную и деформационную составляющие коэффициента трения.

Установлено, что на пластическом контакте при смазке MoS_2 в значении коэффициента трения преобладает деформационная составляющая. Адгезионная составляющая зависит

от свойств MoS_2 на фрикционном контакте и убывает с увеличением предела текучести основы. Деформационная составляющая коэффициента трения зависит от контактного давления, микрогеометрии и твердости металлической поверхности.

Сравнивая граничное трение при наличии на металлических поверхностях пленок адсорбции и окислов (по данным И.В. Крагельского, Боудена и Тейбора) с трением на пластическом контакте при смазке MoS_2 установлено, что адгезионная составляющая коэффициента трения в последнем случае уменьшается в 4 раза по сравнению с первым, а деформационная - в 3 раза.

При упругом контакте значение деформационной составляющей коэффициента трения становится незначительным, вследствие малости параметра $\frac{h_{max}}{R}$ для пленки MoS_2 , поэтому для реальных условий её нет смысла учитывать.

При упругом контакте коэффициент трения можно определять только по адгезионной составляющей:

$$f = \frac{\tau_0}{c\sigma_s} + 0,91\beta$$

Заменяя $c\sigma_s$ через q_2 (действительное контактное давление) и подставляя его значение, после преобразований получили:

$$f = \frac{2\tau_0}{q_2^{3/4} E^{3/4}} \left(\frac{R}{h_{max}} \right)^{3/8} + 0,91\beta$$

Коэффициент трения, выраженный этой формулой, учитывает свойства смазочной пленки MoS_2 через параметры τ_0 , $\frac{R}{h_{max}}$, β , а свойства материала основы - через модуль упругости E . Подставив известные параметры для пленки MoS_2 , получим:

$$f = \frac{35,3}{q_2^{3/4} E^{3/4}} + 0,021$$

В переходный период (период приработки) от пластического контакта к упругому происходит изменение не только коэффициента трения f , но и изменение коэффи-

циента текстуры "С" и толщины смазочной пленки "x₀". Все три параметра изменяются синхронно до некоторых значений, соответствующих стационарному процессу трения (упругий контакт) и описываются подобными по виду кривыми.

Коэффициент трения в период приработки наиболее удобно аппроксимируется функцией вида:

$$f = F(x) = Ae^{-ax^2} + C$$

где А и С - постоянные коэффициенты, соответствующие предельным значениям функции F(x)

a - параметр, характеризующий крутизну кривой,

x - текущая координата времени (мин, сек.)

до стационарного трения (упругий контакт).

Приводится решение этого уравнения, в результате которого получено выражение, характеризующее значение коэффициента трения в любой момент периода приработки:

$$f = F(x) = \frac{1}{2} \left[4(f_0 - f_{uz}) e^{-\frac{2a^2 x^2}{\tau}} + 4f_{uz} - f_0 \right]$$

где f_0 - коэффициент трения при пластическом контакте (начало скольжения),

f_{uz} - коэффициент трения при упругом контакте

τ - время приработки (мин, сек.), определяемое экспериментально.

Проведены лабораторные испытания по определению коэффициента трения при смазке MoS_2 в различные периоды скольжения. Использовались образцы из различных материалов. Испытания проводили на машине трения МИ-1М. Скорость относительного скольжения находилась в диапазоне от 0,06 м/сек до 2,5 м/сек (изменение скоростей осуществлялось гидроприводом). Контактные давления выбирали в диапазоне от 100 кг/см² до 10000 кг/см².

Лабораторные испытания подтвердили в достаточной степени точности предлагаемые расчетные зависимости. Приведены экспериментальные данные по коэффициенту трения при смазке MoS_2 ряда отечественных и зарубежных

185825

ных исследователей. Расхождение экспериментальных результатов с расчетными по предлагаемым формулам не превышает 20%. Минимальное значение коэффициента трения при наличии в контакте смазочной пленки MoS_2 сохраняется в большом диапазоне нагрузок.

В пятой главе рассматриваются результаты производственных испытаний дисульфида молибдена как смазки в узлах трения металлургического и прокатного оборудования. Кратко дается описание узлов трения, где применялась смазка MoS_2 , и условия их работы. Приводится технология подготовки поверхностей для нанесения смазки и метода нанесения смазочной композиции. На основании результатов испытаний отмечаются основные технико-экономические преимущества смазки дисульфидом молибдена узлов трения.

Производственными испытаниями установлено, что при смазке MoS_2 создается возможность замены антифрикционных сплавов цветных металлов на стали. При этом возможно повышение нагрузочной способности фрикционного контакта за счет более высоких механических свойств сталей.

Высокая надежность работы узлов трения обеспечивается созданием на обеих сопряженных поверхностях граничной смазочной пленки MoS_2 , которая не выдавливается при высоких давлениях и обладает стабильными свойствами при различных условиях реализации процесса трения.

Простота и дешевизна устройств для нанесения твердой смазки создают условия для широкого её применения при минимальных затратах.

Применение смазки MoS_2 дает возможность повышения износостойкости узлов трения, там где применение обычных смазок невозможно (запыленная атмосфера, высокие температуры). С применением MoS_2 повышается долговечность узлов трения и облегчаются условия эксплуатации.

В конце работы приведены акты внедрения и экономическая эффективность по каждому узлу в отдельности, где применялась смазка MoS_2 .

В результате проведенной работы:

1) Показано, что дисульфидмолибденовые смазки являются эффективным средством повышения надежности различных узлов трения. Однако необходимый эффект в каждом случае может быть достигнут только при тщательном учете свойств дисульфида молибдена.

2) Методами микровдавливания и царапания измерена микротвердость различных граней кристаллита MoS_2 : микротвердость грани (001) равна 32 кг/мм^2 , микротвердость грани (100) - 900 кг/мм^2 .

Определенная методом абразивного разрушения, поверхностная энергия кристаллита MoS_2 для грани (001) оказалась равной 24 эрг/см^2 , а для грани (100) - 700 эрг/см^2 .

Полученные результаты указывают на значительную анизотропию физико-механических свойств дисульфида молибдена, что обусловлено особенностями кристаллического строения MoS_2 .

3) Изучены условия, влияющие на образование смазочной пленки MoS_2 на металлических поверхностях. В частности, установлена зависимость времени образования смазочной пленки MoS_2 от механических свойств подложки, микрогеометрии её поверхности и нагрузочной характеристики контакта.

Показано, что в процессе образования смазочной пленки происходит преимущественная ориентация кристаллитов MoS_2 гранью (001) параллельно поверхности трения.

Разработан метод количественной оценки степени ориентации кристаллитов (текстуры) MoS_2 в смазочной пленке.

4) Особенностью строения смазочной пленки MoS_2 является наличие поверхностного слоя с совершенной текстурой. Расположение кристаллитов MoS_2 по толщине пленки и их взаимодействие обеспечивает выполнение правила положительного градиента механических свойств, являющегося условием её прочности. В процессе трения контактирующих поверхностей постоянно возникают и разрушаются фрикционные связи по граням (001) MoS_2 с низкими физико-механическими

свойствами. Малое сопротивление разрушению этих связей обуславливает малое сопротивление сдвигу, а, следовательно, низкий коэффициент трения. Таким образом, при граничном трении, механизм смазочного действия дисульфида молибдена определяется особенностями строения смазочной пленки, образующейся на металлических поверхностях, и физико-механическими свойствами кристаллитов MoS_2 .

5) Определены физико-механические свойства смазочной пленки, изучена её микрогеометрия. Сопротивление сдвигу для пленки MoS_2 мало ($\tau_0 = 1,4 \text{ кг/см}^2$) и с ростом контактного давления увеличивается весьма insignificantly ($\beta = 0,023$). Смазочная пленка MoS_2 обладает высокой несущей способностью и выдерживает контактные давления, равные пределу текучести материала основы.

6) Смазочная способность дисульфида молибдена оценивается по коэффициенту трения с учетом физико-механических свойств смазочной пленки и металлической подложки. Предложены аналитические зависимости для определения коэффициента трения при смазке MoS_2 в различные периоды скольжения. Лабораторными исследованиями подтверждены расчетные данные.

7) На основании лабораторных исследований и производственных испытаний установлены условия эффективного использования дисульфида молибдена для смазки поверхностей трения и даны некоторые рекомендации производству. Применение дисульфида молибдена в ряде производственных узлов трения дало значительный экономический эффект, повысило долговечность деталей трения, их нагрузочную способность, облегчило условия эксплуатации.

Результаты работы докладывались:

1. На XI, XX, XXI, XXII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1966, 1967, 1968, 1969 годах.

2. На конференции ученых Южного Урала, посвященной 50-летию Советской власти г. Челябинск, 1967 г.

3. На научно-техническом семинаре в физико-техническом институте АН УССР, Харьков, 1969 г.

4. На научно-технической конференции Бузов Урала по машиностроению, Ижевск, 1970 г.

Список опубликованных работ по теме
диссертации:

1. Брудный А.И. Исследование текстуры смазочного слоя дисульфида молибдена. Сб. Повышение долговечности деталей трения. Челябинск, 1969.
2. Брудный А.И., Сизов Б.М. Влияние температуры на окисление и смазочное действие дисульфида молибдена. Сб. Повышение долговечности деталей трения. Челябинск, 1969.
3. Брудный А.И., Сизов Б.М. к вопросу исследования смазочного действия дисульфида молибдена. Сб. Повышение долговечности деталей трения. Челябинск, 1969.
4. Брудный А.И. Анизотропия микротвердости дисульфида молибдена, определяемая методом вдавливания. Сб. Вопросы динамики, долговечности и надежности машин, Челябинск, 1969.
5. Кармадонов А.Ф., Брудный А.И., Сизов Б.М. Применение дисульфида молибдена как твердой смазки в шаровых опорах. КУ ЦБТИ № 101 (3177), Челябинск, 1968.
6. Кармадонов А.Ф., Брудный А.И., Сизов Б.М. Дисульфид молибдена, как твердая присадка к смазочно-охлаждающей жидкости. КУ ЦБТИ № 98 (3174), Челябинск, 1968.
7. Кармадонов А.Ф., Брудный А.И., Сизов Б.И. Применение дисульфида молибдена для смазки деталей винтовой пары фрикционных процессов. КУ ЦБТИ № 97 (3173), Челябинск, 1968.

8. Кармадонов А.Ф., Брудный А.И., Сизов Б.И. Получение дисульфида молибдена для смазочных целей. ЮУ ЦБТИ № 197 (3273), Челябинск, 1968.
9. Брудный А.И., Сизов Б.М. Уменьшение износа реборд крановых колес. Вестник машиностроения, № 1, 1970.

=====

ФБ03727-12/У-70г. Формат 60x90/16. Объем 1,5 п.л. Отпечатано
на ротационной ЧПИ. Тираж 120 экз. Заказ № 85

=====