

На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

Челябинский политехнический институт  
им. Ленинского комсомола

КИРЬЯНОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ  
НАТЕРТЫХ И НАНЕСЕННЫХ СЛОЕВ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА  
ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Специальность 05.02.02 -  
"Машиноведение и детали машин"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск, 1976

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

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

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
А.Г.БУРГВИЦ;  
кандидат технических наук, доцент  
Ф.К.ЛЕБЕДЕВ.

Ведущее предприятие - Магнитогорский калибровочный завод.

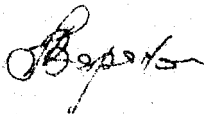
Автореферат разослан " \_\_\_\_ " апреля 1976 года.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " июня 1976 г., в \_\_\_\_ часов,  
в ауд.244 на заседании Специализированного Совета № 2 по присуждению  
ученой степени кандидата технических наук Челябинского политехничес-  
кого института им. Ленинского комсомола.

О диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧПИ.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направ-  
лять по адресу: 454044, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. Поли-  
технический институт, ученому секретарю.

Ученый секретарь Специализи-  
рованного Совета № 2,  
кандидат технических наук,  
доцент



А.И.ВАРАНКИН

Актуальность темы. Обеспечение технического перевооружения и интенсификации производства во всех отраслях является основной задачей промышленности в 10-й пятилетке - пятилетке качества. Неотъемлемой частью поставленной задачи является обеспечение надежности и долговечности современных машин, повышение эффективности технологических процессов, что во многом определяется работоспособностью различных узлов трения и свойствами используемых при этом смазочных материалов.

Важное место в повышении износостойкости узлов трения приобрели твердые слоистые смазочные материалы, среди которых можно выделить дисульфид молибдена ( $MoS_2$ ), благодаря способности обеспечивать внешнее трение в большом интервале контактных нагрузок, скоростей и температур. Большой вклад в изучение свойств и смазочной способности  $MoS_2$  при трении внесли советские (Р.М.Матвеевский, Л.Н.Сентюрихина, И.В.Крагельский, В.Э.Вайнштейн, Г.И.Троляновская, И.И.Маликов, Ю.Н.Дроздов, Л.А.Майорова и др.) и зарубежные ученые (Б.Р.Брейтуэйт, И.К.Ланнастер, А.Зонтаг, И.Генсхаймер и др.).

В зависимости от способности  $MoS_2$  образовывать на металлических поверхностях смазочные слои со связующими веществами или без них было предложено (по Р.М.Матвеевскому) изучать механизм их смазочного действия. Смазочные слои  $MoS_2$  со связующими веществами (твердые смазочные покрытия) подробно изучены Л.Н.Сентюрихиной с сотрудниками, разработаны различные составы смазок, успешно используемые на практике. Однако, изучение свойств смазочных слоев  $MoS_2$  без связующих веществ (натертые и нанесенные слои) подробно до сих пор не проводилось, а научно обоснованный механизм их смазочного действия не предлагался, что сдерживает одно из важных направлений перспективного применения  $MoS_2$  на практике. В связи с этим возникает необходимость изучения условий формирования натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  на металлических поверхностях, их свойств и смазочной способности, определение режимов их рационального использования при трении.

Цель и задачи исследований. Настоящая работа посвящена изучению свойств и смазочной способности натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  при трении. При выполнении работы были поставлены и решались следующие задачи: 1. Дать анализ и рассмотреть возможные связи, возникающие между кристаллитами  $MoS_2$  и металлической подложкой в натертых и нанесенных слоях; 2. Изучить условия формирования натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  на металлических поверхностях; 3. Рассмотреть и исследовать явление переноса микроскопических доз смазки как основное усло-

вие образования натертых слоев  $MoS_2$ ; 4. Определить основные характеристики смазочной пленки  $MoS_2$ , образованной из натертых и нанесенных слоев в процессе трения, и дать оценку ее смазочной способности; 5. Оценить долговечность смазочной пленки  $MoS_2$  и установить факторы, от которых она зависит, вскрыть причину разрушения пленки  $MoS_2$  при трении; 6. Изучить основные условия и особенности применения натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  при пластическом деформировании металлической подложки; 7. На основании теоретических, экспериментальных исследований и производственных испытаний дать технико-экономическое обоснование применения натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$ .

Научная новизна. Установлено, что основным показателем качества натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  является их плотность, от которой зависит величина аутогезионных и адгезионных связей между кристаллитами  $MoS_2$  и металлической подложкой. Показано, что в основе формирования натертых слоев лежит явление переноса микроскопических доз смазки на контактную поверхность, предложена методика изучения явления переноса из прессованных брикетов, натертых, нанесенных слоев и порошка  $MoS_2$ , основанная на анализе текстуры кристаллитов  $MoS_2$ . Установлено, что завершение переноса при образовании натертых слоев  $MoS_2$  происходит при появлении взаимной текстуры. Предложена схема протекания процесса переноса при ротационной смазке и изучены основы этого явления. Показано, что долговечность смазочной пленки  $MoS_2$  (по числу циклов трения), образованной из натертых и нанесенных слоев, зависит, в основном, от контактного давления вплоть до пластического течения подложки, и установлено, что разрушение такой пленки происходит в результате потери кристалличности у  $MoS_2$ , вследствие измельчения кристаллитов  $MoS_2$  при многоцикловом нагружении. Обоснована перспективность применения натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  при пластической деформации металлов, что обуславливается малым числом действия высоких контактных давлений.

Практическая ценность. Определены оптимальные условия образования натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  на металлических поверхностях. Показано влияние плотности слоев  $MoS_2$  и контактного давления на формирование смазочной пленки  $MoS_2$  при трении скольжения. Предлагается методика изготовления смазочных брикетов  $MoS_2$  без связующих веществ и даются рекомендации по их использованию на практике. Показана сравнительная простота и отсутствие существенных затрат при применении натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  на практике, в частности, в процессе волочения. Образующаяся при этом пленка  $MoS_2$  повышает эффективность процесса волочения в целом и улучшает поверхностные свойства деформируемого металла.

Внедрение в производство. Дисульфид молибдена (марки МВ4-1 или МВ4-3) в виде натертых и нанесенных слоев используется при волочении стальной канатной проволоки и фасонного профиля петель автомобилей ВАЗ. Разработаны инструкции по применению  $MoS_2$  в сталепроволочном производстве. Получена экономия от внедрения  $MoS_2$  при волочении проволоки только по одному цеху в размере 420 тыс. руб. в год и 92 тыс. руб. (повышение стойкости 900 т. канатов). Положительные результаты намечено распространить на всё сталепроволочное производство и изготавливать всю канатную проволоку на Магнитогорском калибровочном заводе с применением  $MoS_2$ .

Место проведения и объект экспериментальных исследований.

Исследования проводились на Магнитогорском калибровочном заводе и в лаборатории кафедры "Детали машин и ПТМ" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола. Объект исследований - натертые и нанесенные слои  $MoS_2$ , их свойства и поведение в процессе трения, смазочная способность пленки  $MoS_2$  при внешнем трении и пластическом деформировании подложки.

Апробация работы. Работа рассмотрена и одобрена на научно-техническом совете Магнитогорского калибровочного завода, на заседании кафедры "Детали машин и ПТМ" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, на научно-техническом совете завода "Красный выборжец" (г. Ленинград), на расширенном семинаре группы технологических смазок института "Гипроцветметобработка", на кафедре "Прикладной механики" Магнитогорского горно-металлургического института им. Г.И. Носова.

Отдельные положения работы излагались на Всесоюзных научно-технических конференциях и семинарах (Челябинск, 1973г; Киев, 1974, 1975г.г.; Москва, 1975г; Ташкент, 1975г), на республиканских научно-технических конференциях и семинарах (Ташкент, 1972г; Фрунзе, 1974; Днепропетровск, 1975г), на научно-техническом семинаре (Хабаровск, 1974г) и конференциях преподавателей и сотрудников ЧПИ (Челябинск, 1972, 1974, 1975 г.г.).

Публикация. По теме диссертации опубликовано 10 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения (выводы по работе), приложения (акты испытаний, акты внедрения и др.) и списка литературы. Диссертация содержит 149 страниц машинописного текста, 7 таблиц, 82 рисунка. В списке использованной литературы приведено 166 источников, в т.ч. 53 на иностранном языке.

В первой главе диссертации излагаются общие представления о классификации, свойствах и особенностях структуры твердых смазочных

материалов, указывается на основные требования, предъявляемые к твердым смазкам на практике. На основе последних исследований излагаются основные сведения о кристаллическом строении  $MoS_2$  и, с учетом анализа межатомных связей указывается на анизотропию физико-механических свойств. Наиболее резко анизотропия химических связей выражена по кристаллографическим граням  $(001)MoS_2$  и  $(100)MoS_2$ , где величины поверхностной энергии и микротвердости имеют крайние значения: 24 эрг/см<sup>2</sup> и 700 эрг/см<sup>2</sup>, 32 кгс/мм<sup>2</sup> и 900 кгс/мм<sup>2</sup> соответственно. Анизотропия физико-механических свойств  $MoS_2$  существенно проявляется на скользящем контакте и положена нами в основу объяснения механизма образования слоев  $MoS_2$  и их смазочного действия. Приведены основные теории, пытающиеся объяснить смазочную способность  $MoS_2$  при трении. Применение дисульфида молибдена при трении металлических поверхностей и механизм его смазочного действия необходимо связывать с анизотропией физико-механических свойств  $MoS_2$ , конкретными условиями реализации процесса трения, способом нанесения на поверхности трения и состоянием слоев  $MoS_2$ . В связи с этим обосновывается цель и формулируются задачи исследований.

Во второй главе диссертации рассматриваются способы образования и свойства дисульфидмолибденовых натертых слоев и слоев, нанесенных из летучих суспензий. Способы нанесения слоев из летучих суспензий просты: окунание, распыление из пистолета-распылителя и нанесение кисточкой. Натертые слои  $MoS_2$  образуются в результате переноса смазки из питающего элемента на одну из контактирующих поверхностей. Нанесенные, натертые слои и смазочная пленка  $MoS_2$  являются поликристаллическим состоянием  $MoS_2$ , в которых единичный кристаллит является мельчайшим монокристаллом. Установлено, что при сдвиге разрушение в поликристалле происходит в результате разрыва междолинных связей.

Используя весовой анализ, определены величины плотности для различных состояний  $MoS_2$  при использовании порошка МВЧ-1 ( $d_{ср} \approx 0,8$  мкм). При этом получено для нанесенных слоев -  $1,3+1,95$  г/см<sup>3</sup>; для натертых слоев -  $2,2+3$  г/см<sup>3</sup>; для смазочной пленки -  $3,5+4,25$  г/см<sup>3</sup>. Различные плотности натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  обуславливают определенную степень сближения кристаллитов между собой и металлической подложкой, что влияет на величину энергии адгезионных и аутогезионных связей. Предлагается выражение для оценки энергии адгезионной связи и проанализированы междолинные связи в натертых, нанесенных слоях и смазочной пленке  $MoS_2$ . Адгезионные связи имеют максимальное значение, а оба вида связей зависят от плотности слоев для всех состояний  $MoS_2$ .

Величина адгезионных связей свидетельствует о том, что при трении сдвигобразование локализуется в объеме смазочных слоев без отрыва кристаллитов  $MoS_2$  от самой подложки. Получено, что количество кристаллитов в единице поверхности слоев  $MoS_2$  существенно зависит от размеров кристаллитов и значительно возрастает с уменьшением их дисперсности.

Изучение натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  показало, что их формирование на металлических поверхностях зависит от одних и тех же факторов. При этом под смазочным слоем  $MoS_2$  предлагается понимать такое оптимальное количество и состояние кристаллитов  $MoS_2$ , которое обеспечивает образование граничной смазочной пленки при трении, имеющей оптимальную толщину и определенную структуру.

Исследования по выявлению факторов, влияющих на формирование смазочных слоев  $MoS_2$ , проводили на машине трения СМЦ-2 на металлических образцах, изготовленных из различных материалов с разной шероховатостью поверхности и направленностью микрогеометрического профиля, что соответствует возможным вариантам используемых на практике сопряжений поверхностей узлов трения деталей машин. Наилучшее заполнение, которое мы оценивали по величине плотности слоев, происходит при перпендикулярном и перекрестном направлении микровыступов шероховатостей поверхности относительно скорости скольжения. Наибольшую плотность имеют натертые и нанесенные слои  $MoS_2$  на металлических поверхностях, шероховатость которых соответствует 6-7 классу (по ГОСТу 2.309-73) при использовании порошка МВЧ-1 ( $d_{ср} \approx 0,8$  мкм) и 5-6 классов (по ГОСТ 2.309-73) при использовании порошка МВЧ-4 ( $d_{ср} \approx 6$  мкм). Это указывает на согласованность размеров микровпадин с дисперсностью кристаллитов  $MoS_2$ .

При оценке качества натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  одним из основных свойств надо считать плотность, поскольку последняя существенно влияет на скорость образования граничной смазочной пленки при трении. Установлено, что чем выше плотность натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$ , тем быстрее образуется смазочная пленка при приложении контактного давления, причем увеличение контактной нагрузки способствует быстрейшему формированию смазочной пленки  $MoS_2$ . Влияние материала подложки при образовании смазочной пленки  $MoS_2$  из натертых и нанесенных слоев при трении обнаружено нами только для поверхностей высоких классов шероховатостей, для которых установлено уменьшение скорости образования пленки  $MoS_2$  с ростом твердости металлической подложки.

Третья глава посвящена изучению явления шерошавости при образовании натертых слоев  $MoS_2$  и смазочной пленки, предлагается структура нанесенных, натертых слоев  $MoS_2$ .

В связи с различием в условиях переноса кристаллитов  $MoS_2$  на металлическую поверхность при образовании натертых слоев в работе рассматриваются: 1) перенос кристаллитов  $MoS_2$  из брикета; 2) перенос кристаллитов  $MoS_2$  с натертых и нанесенных слоев при трении; 3) перенос кристаллитов  $MoS_2$  из порошка.

Изготовление прессованных брикетов  $MoS_2$  проводили в диапазоне давлений от 20 кгс/см<sup>2</sup> до 14000 кгс/см<sup>2</sup>. Плотность брикетов увеличивалась с ростом давления прессования, максимальная плотность брикетов  $MoS_2$  не превышает 4,35 г/см<sup>3</sup>, максимальная величина микротвердости не превышает 28 кгс/мм<sup>2</sup>, что соответствует значению микротвердости грани (001) $MoS_2$ . Прочность брикетов на сжатие достигает 300 кгс/см<sup>2</sup>. С увеличением плотности брикетов модуль упругости и растет до значения  $E=18 \cdot 10^3$  кгс/см<sup>2</sup>.

Установлено, что ориентация кристаллитов  $MoS_2$  в поверхностных слоях и в объеме брикетов различна. Для оценки степени текстурирования (преимущественной ориентации) кристаллитов  $MoS_2$  в слоях используется рентгеноструктурный анализ. Предлагается ориентацию кристаллитов  $MoS_2$  оценивать по коэффициенту текстуры выражением  $C=0,25 \frac{I(100)}{I(004)}$ , где  $I(100)$  - интенсивность интерференций (100) $MoS_2$ ;  $I(004)$  - интенсивность интерференций (004) $MoS_2$ . Чем меньше величина "C", тем большее число кристаллитов располагается гранью (001) $MoS_2$  параллельно поверхности брикета. Оказалось, что для поверхностных слоев его значение равно 0,15, а для объемных - более 0,5 (для МВЧ-1).

Исследование явления переноса проводили на установке, обеспечивающей однонаправленное перемещение брикета под нагрузкой ( $P=1$  кгс/см<sup>2</sup>) по поверхности плоского металлического образца (скорость скольжения 0,03 м/с). На гладких поверхностях (VII - VII по ГОСТ 2.309-73) в начале переноса появляется серия микроцарапин от  $MoS_2$ , на что указывал Ланкастер, основываясь на анизотропии микротвердости  $MoS_2$ . В свою очередь, микроцарапины на металле разрушают поверхностные слои брикета  $MoS_2$  и растекстурируют их до положения объемных слоев. Коэффициент текстуры при этом близок к 0,4, после чего начинается интенсивный перенос микроскопических доз смазки. Основываясь на результатах определения текстуры и микроскопическом анализе поверхностей трения брикетов мы выделили три этапа в процессе переноса:

1. Этап растекстурирования поверхностных слоев брикета; 2. Этап активного переноса смазки и восстановления текстуры; 3. Этап сохранения взаимной текстуры в натертых слоях и поверхностных слоях брикета.



В период этапа растекстурирования происходит ориентация кристаллитов гранью (100)  $MoS_2$  перпендикулярно подложке, что обуславливает их перенос на металлическую поверхность, длительность этого этапа незначительна. В случае шероховатой подложки (V4 - V8 по ГОСТ 2.309-73) этот этап почти отсутствует, поскольку растекстурирование поверхностных слоев брикета наступает при первых проходах.

Длительность этапа активного переноса в случае гладкой подложки увеличивается с ростом твердости металла. В случае шероховатой подложки длительность этапа активного переноса гораздо меньше, зависимость от твердости подложки несущественна. Вес натертых слоев, образованных на шероховатых поверхностях, и длительность этапа активного переноса зависят от параметра  $Ka$  подложки.

Рентгеноструктурный анализ натертых слоев  $MoS_2$  и поверхностных слоев брикетов показал, что при гладкой и шероховатой подложках завершение явления переноса происходит при установлении взаимной (равной) текстуры. При этом коэффициенты текстуры в натертых слоях и на поверхности трения брикетов  $MoS_2$  не превышает значения 0,25. Использование шероховатых поверхностей в узлах трения деталей машин является наиболее распространенным явлением. На основе анализа образования натертых слоев  $MoS_2$  на шероховатых поверхностях нами представлена схема протекания процесса переноса, согласно которой предлагается выражение для числа кристаллитов ( $N$ ) на единице поверхности подложки после "п" проходов брикета  $MoS_2$  и дается его решение в виде:

$$N = \frac{1}{2} N_0 \frac{R_E}{d_{cp}} \left( 1 - e^{-\frac{\rho d}{R_E}} \right), \quad (I)$$

где  $N_0$  - количество кристаллитов в 1 см<sup>2</sup> поверхности подложки при толщине слоя равного  $d$  ср. (определяется аналитически);  $R_E$  - среднее арифметическое отклонение максимальных микровыступов;  $d_{cp}$  - средний размер кристаллитов  $MoS_2$ ;  $\rho$  - вес натертых слоев  $MoS_2$ ;  $\alpha = \frac{d_{cp}}{N_0 \cdot d \cdot K_2}$ ;  $K_2$  - коэффициент пропорциональности.

Вес натертых слоев  $MoS_2$  определялся на металлических подложках различной шероховатости через определенное число проходов брикета  $MoS_2$ . Параметр  $\rho \cdot d / R_E$  определяется по графику в зависимости от величины  $R_E$  и  $K_2$ . При значении  $\rho \cdot d / R_E$  равном 1 можно приблизительно установить длительность этапа активного переноса по числу проходов брикета. Чем больше величина  $R_E$ , тем выше длительность этапа активного переноса. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и исследовании узлов трения деталей машин с ротапринтной смазкой.

На практике зачастую удается наносить смазочные слои на одну из контактирующих поверхностей. Поэтому были проведены исследования переноса смазки с натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  на несмазанную поверх-

ность на машине трения СМЦ-2 при различных нагрузках (41±235 кгс) и скоростях скольжения (0,0785±0,524 м/с).

Используя рентгеноструктурный анализ, установлено, что коэффициенты текстуры в натертых ( $c \geq 0,25$ ) и нанесенных слоях ( $c > 0,4$ ) различны, а явление активного переноса наступает при значениях коэффициента текстуры, близких к 0,4. При этом длительность этапа активного переноса выше у натертых слоев  $MoS_2$ . При использовании натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  перенос завершается образованием на обеих контактных поверхностях граничной смазочной пленки  $MoS_2$ , значение коэффициента текстуры которой не превышает величины 0,17. Предельная величина нанесенных и натертых слоев  $MoS_2$  ограничивает толщину слоев, образованных при переносе на несмазанной поверхности.

При переносе из порошка натертые слои  $MoS_2$  образуются вблизи контактной зоны, где обеспечивается достаточное сближение кристаллитов  $MoS_2$  между собой и металлической подложкой. При этом, плотность и вес натертых слоев зависит от степени шероховатости подложки и контактного давления. Условия захвата смазки из порошка весьма просты, не вызывают особых затруднений на практике, что позволило нам использовать этот метод при волочении стальной канатной проволоки.

Используя данные по коэффициенту текстуры и результаты исследования явления переноса, предложены модели структур натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  и показано, что расположение кристаллитов в смазочной пленке является более совершенным и не зависит от того из каких слоев она получена, что указывает на равную перспективность использования нанесенных и натертых слоев  $MoS_2$  на практике.

В четвертой главе содержатся результаты исследования физико-механических свойств и микрогеометрических характеристик граничной смазочной пленки, образованной из нанесенных и натертых слоев  $MoS_2$ , оценка ее смазочной способности, долговечности и термической стабильности, дается анализ разрушения пленки  $MoS_2$  в процессе трения.

Образование смазочной пленки из натертых и нанесенных слоев происходит при трении в период приработки, где коэффициент трения снижается до устойчивого минимального значения, зависящего от свойств металлической подложки и контактного давления.

Микрогеометрические характеристики пленки  $MoS_2$  изучались при внешнем и пластическом трении. Внешнее трение осуществлялось на машине трения СМЦ-2, пластическое трение (с деформацией подложки) проводили на специальном роликовом стенде. С поверхности пленки  $MoS_2$ , образованной в обоих случаях, на профилометре-профилографе М-20Г снимали

профилограммы, которые обрабатывали по методике Н.Б.Демкина. При внешнем трении получено:  $\delta_{max} = 0,2$  мкм;  $R = 200$  мкм;  $\sigma = 1,32$ ;  $\nu = 1,55$ ;  $\Delta = 0,68 \cdot 10^{-2}$  и при пластическом трении  $\delta_{max} = 0,3$  мкм;  $R = 320$  мкм;  $\sigma = 1,9$ ;  $\nu = 1,45$ ;  $\Delta = 0,58 \cdot 10^{-3}$ . Величина  $\Delta = \frac{\delta_{max}}{R \cdot \sigma}$  (по В.С.Комбалову) используется при анализе трения. Значение " $\Delta$ " для пленки  $MoS_2$  соответствует этой величине для поверхностей высоких классов шероховатости, что свидетельствует о способности  $MoS_2$  улучшать микрогеометрию контакта.

Микротвердость пленки  $MoS_2$  изменяется в интервале 20-28 кгс/мм<sup>2</sup>, что соответствует микротвердости поликристаллического брикета.

Толщину пленки  $MoS_2$  оценивали с использованием рентгеноструктурного анализа по методике, предложенной А.И.Брудным. При использовании нанесенных слоев толщина пленки  $MoS_2$  в начале периода стационарного трения находилась в пределах 2+4 мкм, при использовании натертых слоев - 2,5+5 мкм. Независимо от состояния слоев  $MoS_2$  предельная толщина пленки  $MoS_2$  в период локального задира соответствовала 0,4+0,6 мкм.

Сопротивление срезу при отсутствии нормального давления ( $\tau_0$ ) и пьезо коэффициент упрочнения адгезионной связи ( $\beta$ ) приняты по данным А.И.Брудного:  $\tau_0 = 1,4$  кгс/см<sup>2</sup>,  $\beta = 0,023$ .

И.В.Крагельским с В.А.Дружновым получено выражение для порога внешнего трения, которое с учетом микрогеометрических параметров пленки  $MoS_2$  представлено нами в виде:  $\Delta \geq \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{\sigma} \sqrt{\frac{1 - \frac{\tau_0 + \beta \sigma}{\sigma}}{\sigma}}$ , (2) где  $\sigma$  - относительная площадь контакта. Значения, которые можно получить при вычислении правой части неравенства (2) почти на три порядка больше величины " $\Delta$ ". Это указывает на то, что порог внешнего трения при наличии в контакте пленки  $MoS_2$  не наступает и трение, в таком случае, всегда является внешним.

Величину внедрения, соответствующую переходу упругого контакта к пластическому, выраженную в долях радиуса неровностей (по И.В.Крагельскому), мы преобразовали с учетом параметра " $\Delta$ " и представили через контактное давление  $q = \frac{\sigma \cdot \Delta^{2/3} \cdot \nu^{1/3} \cdot E}{1,55}$ . (3) При этом получили, что контакт является упругим даже при высоких давлениях, близких к пределу текучести материала.

Оценка смазочной способности пленки  $MoS_2$  производится нами по коэффициенту трения. Преобразуя известное выражение И.В.Крагельского, установлена зависимость коэффициента внешнего трения от контактного давления и получена формула для аналитической оценки:

$$f = \frac{37,2}{q^{1/4} E^{3/4}} + 0,026 \left( \frac{1,59 E}{H} \right)^{1/3} + 0,027. \quad (4)$$

Одной из важных характеристик пленки  $MoS_2$  является ее долговечность. Истирание пленки  $MoS_2$  проводили на машине СМЦ-2, давления в

контакте изменялись в диапазоне значений 600–6000 кгс/см<sup>2</sup>, скорости скольжения – 0,157+0,524 м/с. Установлено, что интенсивность износа смазочной пленки существенно зависит от контактного давления, с увеличением которого уменьшается долговечность пленки. Мы представили долговечность пленки через число циклов трения, причем, вместо контактного давления ( $q_c$ ) принимали его отношение к действительному ( $q_2$ ) в виде  $\chi = \frac{q_c}{q_2}$ . Тогда на участке изменения  $\chi$  от 0,1 до 1 можно записать:

$$\left. \begin{array}{l} 1. Ae^{-ax^2} + C = \pi_R \quad \text{при } \chi = 0,1 \\ 2. Ae^{-ax^2} + C = \pi_E \quad \text{при } \chi = \chi_E \\ 3. Ae^{-ax^2} + C = \pi_0 \quad \text{при } \chi = \chi_R \end{array} \right\} \chi [0,1; \chi_R] \quad (5)$$

Решая систему уравнений, получено выражение для приближенной оценки долговечности пленки  $MoS_2$  по числу циклов трения:

$$n(\chi) = 10A \left( \pi_R \cdot e^{-\frac{2a\chi^2}{\chi_E^2}} - 0,04 \pi_R \right). \quad (6)$$

Для определения долговечности пленки  $MoS_2$  по выражению (6) экспериментально устанавливали величину  $\pi_R$  при оптимальной микрогеометрии подложки (УБ по ГОСТ 2.309-73) и контактном давлении при  $\chi = \frac{q_c}{q_2} = 0,1$  (где  $q_2$  можно принять за НВ). Для медных поверхностей  $\pi_R = (11 \div 12) \cdot 10^3$  циклов.

Исследование явлений, происходящих в дисульфидомолибденовой пленке при трении и разрушении, проводили с помощью рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии и дифракции, термографии. При этом оценивали влияние температуры, скорости скольжения и контактного давления при трении. Установлено, что значительное повышение коэффициента трения происходит при окислении  $MoS_2$  более чем на 10%, что соответствует окислению при температуре 350°C.

Скорость скольжения до 0,5 м/с на смазочную способность  $MoS_2$  влияния не оказывает. Влияние контактного давления изучали на образцах в начале, середине и конце периода установившегося трения, для которых  $\frac{q_c}{q_2} = 0,8$ . Исследования показали, что в процессе трения происходит измельчение кристаллитов  $MoS_2$  в смазочной пленке до размеров менее 100Å, что приводит ее к частичной аморфизации. В такой пленке, по-нашему мнению, не могут возникать адгезионные и аутогезионные связи кристаллитов  $MoS_2$ . Рентгеноструктурный анализ продуктов разрушения пленки  $MoS_2$  (при задире) показал вырождение всех рефлексов, свидетельствующее о том, что продукты износа пленки являются аморфизированными агрегатами. Однако, до определенного момента, соответствующего долговечности пленки, она остается работоспособной, что обусловлено прочностью аутогезионных и адгезионных связей между кристаллитами  $MoS_2$  и металлической подложкой.

Пятая глава содержит результаты исследований и применения натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  при пластическом деформировании металлической подложки, производственные испытания и технико-экономические показатели применения смазочных слоев  $MoS_2$ . Приводятся методика и результаты определения толщины и текстуры пленки  $MoS_2$  при использовании натертых и нанесенных слоев при волочении стальной канатной проволоки и фасонного профиля (сталь М12Х). При этом показано положительное влияние  $MoS_2$  на распределение микротвердости в поверхностных слоях деформируемого материала, улучшение качества продукции и технологичности процесса волочения.

Исследуя продукты износа смазочной пленки (потери смазки) после волочения при помощи рентгеноструктурного анализа, мы не обнаружили потери кристалличности у  $MoS_2$ , что свидетельствует о перспективности использования натертых слоев  $MoS_2$  при волочении.

Практическая часть работы по использованию натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  проведена в цехах Магнитогорского калибровочного завода на различных станах.

В конце главы приводятся технико-экономические показатели применения дисульфида молибдена в сталепроволочном производстве.

Годовой экономический эффект при волочении стальной канатной проволоки составляет 420 тыс.руб. по одному цеху (акт внедрения).

## В Н В О Д И:

1. На формирование натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  существенное влияние оказывают механические и микрогеометрические свойства поверхностей деталей трения, а также способ образования этих слоев.

2. В процессе приработки из натертых и нанесенных слоев образуется граничная смазочная пленка, формирование которой зависит от контактного давления и плотности слоев, обуславливающих проявление аутогезионных и адгезионных связей кристаллитов  $MoS_2$  между собой и металлической подложкой.

3. Исследование поликристаллического состояния  $MoS_2$  позволило изучить свойства натертых, нанесенных слоев и смазочной пленки  $MoS_2$ . Установлены значения коэффициента текстуры для натертых слоев ( $c > 0,25$ ), нанесенных слоев ( $c > 0,4$ ) и смазочной пленки  $MoS_2$  ( $c \in 0,17$ ) обуславливающие различную ориентацию кристаллитов  $MoS_2$ .

4. Используя изменение значения коэффициента текстуры, в различные периоды контактирования, изучено явление переноса, как основа образования натертых слоев  $MoS_2$  при трении. Интенсивность переноса смазки из брикета или из слоев  $MoS_2$  выше при большем значении коэф-

фициента текстуры. Установлено, что процесс переноса смазки начинается с растекстурирования кристаллитов в поверхностном слое контактирующего брикета или в натертых слоях  $MoS_2$ , что соответствует значению коэффициента текстуры  $s \geq 0,4$ .

5. Длительность этапа активного переноса смазки при использовании гладкой подложки зависит от твердости металла и от параметра  $Rq$  - при шероховатой поверхности. Завершение переноса смазки происходит при установлении в поверхностных слоях брикета и натертых слоях  $MoS_2$  взаимной (равной) текстуры, значение которой не превышает величины 0,25. Результаты изучения явления переноса могут быть использованы при разработке и исследовании узлов трения с ротапиритной смазкой.

6. Предельная толщина натертых и нанесенных слоев ограничивает толщину слоев  $MoS_2$ , образованных при переносе на несмазанную поверхность. При переносе смазки из порошка вес натертых слоев  $MoS_2$  зависит от шероховатости подложки и контактного давления.

На основе изучения свойств брикетов  $MoS_2$  и явления переноса предлагаются модели структуры натертых, нанесенных слоев и граничной смазочной пленки  $MoS_2$ .

7. Для граничной смазочной пленки  $MoS_2$ , образованной из натертых и нанесенных слоев при трении установлена зависимость коэффициента трения от контактного давления, которое оказывает существенное влияние на её долговечность.

8. Используя методы физического исследования (рентгеноструктурный анализ, электронную микроскопию и термографию), установлена стабильность свойств дисульфидмолибденовой пленки при внешнем трении. Показано, что в режиме стационарного трения при температурах до  $300^\circ C$  существенного окисления  $MoS_2$  не происходит и влияние температуры на долговечность пленки  $MoS_2$  не обнаружено.

Влияние высоких контактных давлений на долговечность пленки  $MoS_2$  сказывается только при многократном нагружении в результате чего происходит изменение исходного состояния кристаллитов  $MoS_2$  в смазочной пленке, что выражается в измельчении их до размеров менее  $100\text{Å}$  и аморфизации пленки, являющейся основной причиной ее разрушения.

9. Основываясь на отсутствии измельчения кристаллитов  $MoS_2$  при малом числе действия высоких контактных давлений, проведены практические исследования натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  при пластическом деформировании металлической подложки

Практическое использование натертых и нанесенных слоев  $MoS_2$  при волочении позволило улучшить качество поверхности, распределение механических свойств по сечению деформируемого металла, технологичность процесса волочения и сэкономить значительные государственные средства.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Влияние степени окисления дисульфида молибдена на его смазочные свойства. Материалы первой Республиканской научно-технической конференции "Производство и научно-техническое творчество молодых ученых и специалистов". Ташкент, 1972.
2. Оценка микрогеометрии поверхности пластически деформированного металла при применении твердой смазки. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Пластмассы и твердые смазки в тяжело нагруженных узлах трения машин". Челябинск, 1973 (соав. А.Ф.Кармадонов, А.И.Брудный).
3. Исследование влияния нагрузки на коэффициент трения и долговечность дисульфидмолибденовой пленки. Сб. научных трудов № 142, "Машиноведение". Челябинск, 1974.
4. Влияние степени окисления дисульфида молибдена на его смазочные свойства. "Химия и технология топлив и масел" № 10, 1974 (соав. А.Ф.Кармадонов, А.И.Брудный).
5. Оценка износа и долговечности твердой дисульфидмолибденовой пленки в зависимости от условий трения. Тезисы докладов научно-технического семинара "Повышение надежности и долговечности деталей машин и механизмов". Хабаровск, 1974 (соав. А.Ф.Кармадонов, А.И.Брудный).
6. Изучение влияния типа твердой смазки на формирование микрогеометрии поверхности при пластическом деформировании. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции "Пластмассы и твердые смазки в тяжело нагруженных узлах трения машин". Челябинск, 1974 (соав. А.Ф.Кармадонов, А.И.Брудный).
7. Оценка эффективности дисульфидмолибденовой смазки при волочении проволоки и при работе в стальных канатах методом микротвердости. Сб. "Достижения в области разработки и применения новых технологических смазок для волочения". Киев, 1974 (соав. А.И.Брудный, А.Ф.Кармадонов).
8. Исследование эффективности дисульфида молибдена при волочении стальной канатной проволоки на однопрядных и двоядных волокнах. Сб. "Достижения в области разработки и применения новых технологических смазок". Киев, 1975 (соав. А.И.Брудный).
9. Исследование явления переноса при ротационной смазке в начальный период трения. Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции "Теория трения, износа и смазки". Ташкент, 1975 (соав. А.И.Брудный, А.Ф.Кармадонов).

Ю. Опыт применения дисульфида молибдена при волочении стальной канатной проволоки. Тезисы докладов второй Республиканской научно-технической конференции "Трение и технологические смазки при обработке металлов давлением". Днепропетровск, 1975 (соав. А.Ф.Кармадонов).

Материалы диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах;

1. XXV, XXVI, XXVII, XXIX научно-технических конференциях ЧПИ. Челябинск, 1972, 1974, 1975, 1976.

2. Республиканской научно-технической конференции "Производство и научно-техническое творчество молодых ученых и специалистов". Ташкент, 1972.

3. Всесоюзной научно-технической конференции "Пластмассы и твердые смазки в тяжелонагруженных узлах трения". Челябинск, 1973.

4. Семинаре "Достижения в области разработки и применения новых технологических смазок для волочения". Киев, 1974.

5. Юбилейной научно-технической конференции Фрунзенского политехнического института. Фрунзе, 1974.

6. Научно-техническом семинаре "Повышение надежности и долговечности деталей машин и механизмов". Хабаровск, 1974.

7. Семинаре "Технологические смазки для процессов волочения, штамповки и гидропрессования изделий из черных и цветных металлов". Киев, 1975.

8. Всесоюзной научной конференции "Теория трения, износа и смазки". Ташкент, 1975.

9. Второй республиканской научно-технической конференции "Трение и технологические смазки при обработке металлов давлением". Днепропетровск, 1975.

10. Научном семинаре по трению и износу в машинах им. проф. М.М.Хруцова. Гос. НИИ Машиноведения. Москва, 1975.