

1. 892(043)

816

ВНЕШНЕКОМ  
СЕРВИС

На правах рукописи

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

СТОЛЯРОВА Валентина Алексеевна

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЗОЧНЫХ СВОЙСТВ ДИСУЛЬФИДА  
МОЛИБДЕНА ПРИ ВЫСОКИХ КОНТАКТНЫХ  
ДАВЛЕНИЯХ

Специальность 05.02.02 --  
"Машиноведение и детали машин"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск, 1973

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

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

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Крагельский И.В.,  
кандидат технических наук, доцент Безруков В.И.

Ведущее предприятие - Магнитогорский калибровочный завод.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1973 г.

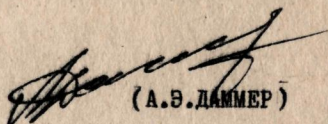
Защита состоится 17 мая 1973г., в 15 часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней машиностроительных факультетов Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола (аудитория 244).

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета по присуждению ученых степеней или прислать отзыв в 2-х экземплярах, заверенных печатью.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке.

Адрес института: 454044, Челябинск, 44, проспект им. В.И. Ленина, 76. Телефон 39-39-64.

Ученый секретарь Совета  
доцент, канд. техн. наук



(А.А.ДАММЕР)

Важнейшей задачей, стоящей перед машиностроением, является повышение качества и долговечности машин, механизмов и оборудования. Выполнение этой задачи связано с необходимостью совершенствовать технологические операции, способствующих обеспечению качества и улучшению условий работы деталей машин. Существенную роль при этом играет смазка, применение которой, как при выполнении технологических операций, так и при работе в узлах трения, во многом определяет надежность большинства деталей и механизмов. От условий применения и качества смазки зависит длительность межремонтного цикла работы механизмов, стойкость технологического инструмента, затраты мощности на преодоление рабочих сопротивлений и, следовательно, экономические затраты производства, связанные с изготовлением, обслуживанием и эксплуатацией машинной техники.

Выход из строя многих деталей машин, работающих в тяжелых условиях трения, часто вызван концентрацией нагрузок, при которых местные напряжения достигают предела текучести - начала пластической деформации. При этом возможен значительный разогрев поверхности. В этих условиях к смазке предъявляют дополнительные требования: надежное разделение трущихся поверхностей, высокая несущая способность и стабильность смазочных свойств.

Жидкие и консистентные смазки не могут обеспечить нормальную работу в тяжелых условиях эксплуатации из-за их недостаточной несущей способности и низкой температурной стойкости. Эти смазки легко выдавливаются из зоны трения и изменяют свои реологические свойства: испаряются при высоких и загустевают при низких температурах.

Одной из важнейших особенностей твердых смазок является их способность работать при больших давлениях и повышенных температурах.

Наиболее перспективным из твердых смазок является дисульфид молибдена, физико-механические свойства которого делают эффективным его применение в тяжелых условиях трения. Однако свойства дисульфида молибдена при высоких нагрузках изучены недостаточно. Для получения наибольшего эффекта необходимо знать не только поведение и свойства смазки при высоких контактных давлениях, но выявить закономерности изменения этих свойств под действием основных параметров процесса.

Тяжелые условия реализации трения особенно характерны для многих технологических операций, связанных с изменением формы и размеров деталей:ковки, штамповки, волочения, прокатки. Особенностью этих процессов является наличие высоких контактных давлений в зоне деформации (до  $20000 \text{ кг/см}^2$ ) пластического сдвига поверхностных слоев металла и повышенных температур. Трение здесь следует рассматривать как совокупность явлений, происходящих в смазочной пленке (внешнее трение) и в приповерхностных слоях деформируемого металла (внутреннее трение). При этом внешнее трение, обусловленное состоянием смазочного слоя, изменяет условия внутреннего трения, а последнее оказывается на изменении физико-механических свойств приповерхностных слоев. Следовательно, эффективность смазки будет определяться не только показателями внешнего трения, но и физико-механическими свойствами обрабатываемого металла. В основу работы положены исследования свойств твердой смазки дисульфида молибдена, как в чистом виде, так и в составе различных композиций, в условиях высоких контактных давлений и повышенных температур и влияние его на изменение структуры и физико-механических свойств приповерхностных слоев деталей трения.

Указанные условия наиболее полно проявляются в процессе волочения проволоки, где сохраняется высокая стабильность процессов: давления, температуры, величины деформации. В работе исследовалось состояние смазочной пленки и приповерхностных слоев проволоки при циклических воздействиях нагрузок, вызывающих пластическое деформирование металла.

Работа состоит из 4-х глав.

В первой главе диссертации разбираются особенности процесса трения и механизма смазочного действия при высоких контактных давлениях, определяется роль смазки при пластическом трении на примере волочения проволоки и формулируются задачи исследований. На основании литературных данных описываются структура и свойства некоторых твердых смазок, среди которых особое внимание уделено дисульфиду молибдена и графиту, имеющих слоистую структуру.

Во второй главе рассматриваются условия образования опти-

мального смазочного слоя дисульфида молибдена. Установлена закономерность изменения коэффициента трения от числа переходов волочения. На основе молекулярно-механической теории трения дан анализ внешнего трения, определены составляющие коэффициента трения при пластическом деформировании и наличии в контакте смазочной пленки дисульфида молибдена.

Установлено, что эффективность проявления смазочных свойств зависит от способа подачи смазки в зону трения, процентного содержания дисульфида молибдена, как присадки к технологической смазке, числа циклов трения.

Чистый  $MoS_2$ , ввиду высокой степени его агрегации и накопления во внеконтактной зоне, нельзя подавать в зону трения по каналу обычной волоки. Для равномерного распределения смазки по поверхности проходящей проволоки необходимо наличие легкотекучей среды, к которой  $MoS_2$  добавляется, как наполнитель. Поэтому дисульфид молибдена применяют как присадку к технологическим смазкам. При выборе оптимальной концентрации  $MoS_2$  в технологической смазке (натровом мыле) за оценочный критерий принималось усилие волочения проволоки, протянутой при различных добавках  $MoS_2$  (от 2 до 100%).

Исследования проводили в лабораторных и производственных условиях. Для экспериментальных исследований в лабораторных условиях была спроектирована специальная волочильная установка. Усилие волочения записывалось электронным потенциометром типа ЭПМ-120, электрическая схема которого была перестроена на измерение электросопротивлений датчиков. Показания подавались от тензодатчиков, наклеенных на волокодержатель и образующих с датчиками потенциометра мостовую схему.

Для замера усилий волочения в производственных условиях были изготовлены приспособления с установленными в них электрическим и механическим датчиками. Как в производственных, так и в лабораторных условиях, результаты записывали на диаграммы, по которым определяли величину усилия волочения и оценивали плавность работы на различных смазках. При обработке диаграмм записей для каждого случая строился вариационный ряд, на основе которого определяли среднее значение усилия волочения. Наименьшее значение усилия волочения наблюдалось при содержании дисульфида молибдена в технологической смазке в пределах 6-15%. Однако, учитывая высокую стоимость ди-

сульфида молибдена, экономически выгодно применять присадку 6-8%  $MoS_2$ .

Определены коэффициенты трения при смазке дисульфидом молибдена и натровым мылом при шестикратном цикле волочения с разной и одинаковой степенью обжатия по переходам. В основу оценки коэффициента трения положены усилия волочения и предел текучести проволоки. Установлено, что во всех случаях существует участок приработки (первый переход), когда коэффициент трения высокий (рис. I). Минимальное значение коэффициента трения наблюдается на третьем переходе. Применение смазки  $MoS_2$  снижает коэффициент трения на третьем переходе на 30% по сравнению с мылом. Повышение сил трения на пятом и шестом переходах, очевидно, связано с изменением внешнего трения, поскольку режимы деформации остаются постоянными на всех переходах.

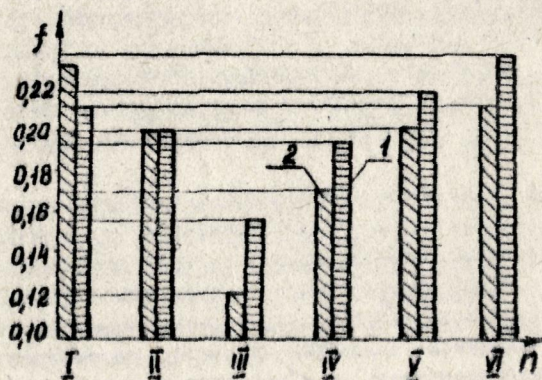


Рис. I. Изменение коэффициента трения по переходам волочения для смазок:  
1 - мыло; 2 - дисульфид молибдена

Рассчитаны значения контактного давления по переходам волочения для различных смазок. Во всех случаях контактное давление возрастает с увеличением суммарного обжатия.

Для анализа полученной закономерности изменения коэффициента трения изучали характеристики фрикционного контакта при внешнем

трении. Вследствие шероховатости поверхности и дискретности контакта в точках фактического касания развиваются высокие давления, приводящие к взаимному внедрению неровностей, изменению площади фактического контакта и микрогеометрии поверхности.

Характеристики микрогеометрии контакта определяли по кривым опорных поверхностей, построенным на основе профилограмм, снятых с поверхностей трения под  $45^\circ$  к направлению усилия волочения. Образцами служили отрезки стальной полосы после каждого из 3-х переходов волочения между неподвижными роликами. Заготовку перед волочением натирали порошком дисульфида молибдена.

Параметры кривой опорной поверхности "б" и "в" найдены графоаналитическим способом (по методике Н.Б.Демкина) для каждого из 3-х переходов. Из анализа следует, что на I переходе происходит значительное изменение микрогеометрии поверхности, связанное с пластической деформацией основы. Чистота поверхности возрастает от первого перехода к третьему.

Поскольку наилучшие условия внешнего трения реализуются при упругом контакте, а минимальный коэффициент трения наблюдается при переходе пластического контакта в упругий, для оценки внешнего трения необходимо определить вид контактирования и критерии перехода одного вида контакта в другой. Такими критериями являются величина относительного внедрения  $\frac{h_k}{R}$  и контурного давления -  $q_c$ ; где  $h_k$  - глубина внедрения при скольжении;  $R$  - радиус неровностей.

Для выбранных условий, с учетом свойств материала контакта, внешнее трение невозможно при  $\frac{q_c}{R} > 0,276$ . Давление, соответствующее порогу внешнего трения при наличии смазки дисульфида молибдена, выражается:

$$q_c = \left( \frac{0,276R}{h_{max}} \right)^2 \frac{6C\sigma_s}{2},$$

а величина критического контурного давления, соответствующего переходу упругого контакта в пластический, находится из условия:

$$q_{c.(кр)} = \left[ 2,4 \left( \frac{C\sigma_s}{E} \right)^2 \frac{R}{h_{max}} \right]^2 \frac{6C\sigma_s}{2}, \quad (I)$$

где  $C$  - коэффициент, учитывающий форму выступов и повышение несущей способности контакта в результате наклепа;

$\sigma_s$  - предел текучести материала основы;  
 $h_{max}$  - максимальная высота неровностей;  
 $E$  - модуль упругости материала.

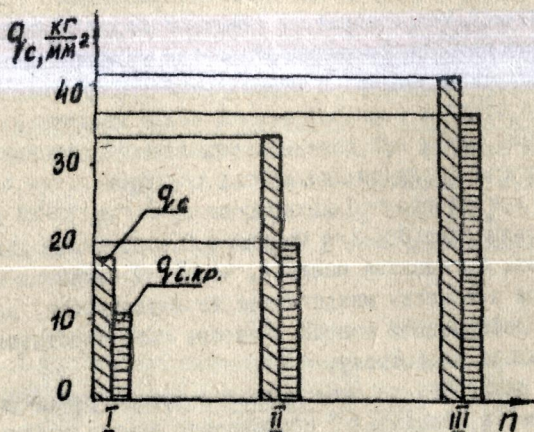


Рис.2. Изменение критического ( $q_{c(кр)}$ ) и фактического ( $q_c$ ) контурного давления по переходам волочения при смазке дисульфидом молибдена

Значения  $q_{c(кр)}$ , полученные расчетом по формуле (I), и фактические значения  $q_c$  по переходам представлены на графике (рис.2). Результаты свидетельствуют о том, что внешнее трение осуществляется на всех переходах волочения при пластическом контакте. Однако параметры " $\delta$ " и " $\nu$ " опорной кривой характеризуют лишь форму наиболее высоких выступов поверхностей трения, деформируемые пластически. Остальная часть выступов деформируется упруго. Для подтверждения рассчитали упругую ( $f_u$ ) и пластическую ( $f_n$ ) долю площади контактов по циклам трения. На первом переходе выступы микронеровностей претерпевают значительную пластическую деформацию, в результате часть выступов получает наклеп и в дальнейшем деформируется упруго (см.рис.3). Последующий рост относительной площади касания обусловлен возрастанием упругой составляющей и на третьем переходе  $f_n \approx f_u$



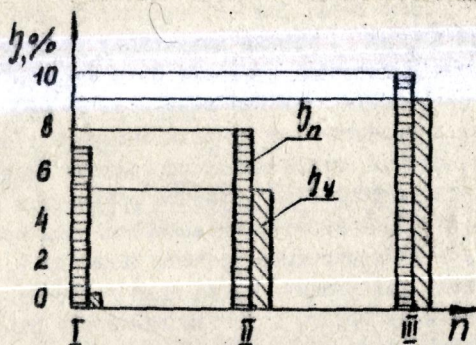


Рис.3. Изменение площадей упругого ( $\sigma_n$ ) и пластического ( $\sigma_p$ ) контактов по переходам волочения при смазке дисульфидом молибдена

При этом критическое значение контурного давления  $q_{с(кр)}$  близко к действительному значению  $q_c$ . Таким образом, условия внешнего трения на третьем переходе вплотную приближаются к критическим значениям, соответствующим переходу упругого контакта в пластический.

Расчет составляющих коэффициента внешнего трения по переходам показал, что изменение коэффициента трения обусловлено его деформационной составляющей  $f_{деф}$ . Рассчитано предельное значение  $f_{деф}$ , соответствующее порогу внешнего трения при наличии в контакте смазки  $MoS_2$  ( $f_{деф} = 0,21$ ).

Измерения предельных составляющих  $f_{деф}$  при наличии пленок окислов (граничное трение), проведенное Ф.П.Бюденем и Д.Тейбором, показали, что  $f_{деф} = 0,595$ . По данным И.В.Крагельского и Н.М.Михина предельное значение  $f_{деф}$  составляет 0,50-0,55. Таким образом, применение смазки  $MoS_2$  позволяет деформационную составляющую, играющую основную роль в полном коэффициенте трения, снизить в 2,5 раза.

В работе показано, что полный коэффициент трения при волочении проволоки изменяется за счет объемной составляющей  $f_{об}$ , которая учитывает внешнее и внутреннее трение. С уменьшением  $f_{деп}$  будет уменьшаться и  $f_{об}$ . Однако дальнейшее увеличение коэффициента трения после III перехода не может быть связано с изменением микрогеометрии поверхности, так как параметры ее после второго перехода почти не изменяются, а условия внешнего трения, как будет показано ниже, во многом определяются состоянием смазочного слоя.

В третьей главе диссертации изложены результаты исследований состояния смазочного слоя дисульфида молибдена под воздействием основных параметров пластического трения: давления в контакте, температуры, степени деформации, числа циклов трения. Это позволило дать анализ внешнему трению с учетом изменения структуры и толщины смазочной пленки дисульфида молибдена.

Исследовалось влияние условий пластического трения на стабильность  $MoS_2$  и композиций. Важнейшими параметрами при этом являются давление и температура в контакте. При волочении проволоки температура зависит от степени деформации и скорости, давление — от степени деформации. При этом контактные температуры, зависящие от скорости, могут достигнуть  $800^{\circ}C$  (при  $V = 600$  м/мин). Средние температуры в контакте пропорциональны степени обжатия. При обжатии 25%  $t_{ср} \approx 250^{\circ}C$ .

Влияние контактных и средних температур на стабильность смазок:  $MoS_2$ , мыло + 8%  $MoS_2$  и чистого мыла можно оценить с помощью термогравиграмм, записанных на деривотографе. С этой целью одновременно записывались три дифференциальные кривые: изменение температуры внутри печи, изменение температуры смазки и изменение веса смазки. Результаты показали, что чистое натровое мыло в пределах обычных производственных обжатий не является стабильной смазкой, температура его разложения около  $120^{\circ}C$ . Композиция мыла и 8%  $MoS_2$  стабильно работает до  $160^{\circ}C$ , а при повторном использовании — до  $280^{\circ}C$  (жженая смазка), что соответствует обжатию более, чем 25%. Средние температуры не влияют на стабильность чистого  $MoS_2$ , так как температура его разложения выше средних температур в контакте.

Контактная температура пропорциональна времени контактирования, которое зависит от скорости деформации. Построены графики зависи-

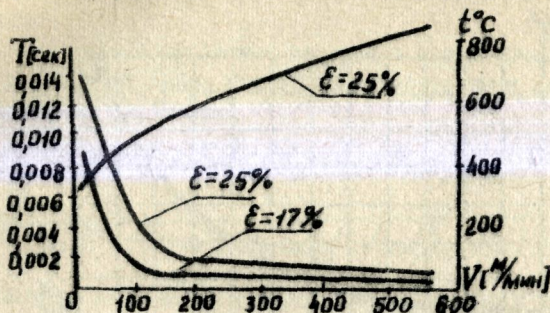


Рис. 4. Зависимость контактной температуры и времени контакта от скорости волочения

ностей времени контактирования от скорости деформации при разной степени деформации (рис. 4) и скорости реакции окисления  $MoS_2$  от температуры (рис. 5), по которым можно подсчитать глубину окисленного слоя при различной скорости и температуре. Так при скорости 400 м/мин и температуре  $600^{\circ}C$  глубина окисленного слоя составляет  $0,56 \cdot 10^{-3}$  мкм, или на 3-4 порядка меньше, чем толщина слоя смазки.

Такой малый окисленный слой не может существенно влиять на стабильность смазки.

Влияние высоких контактных давлений на состояние слоя  $MoS_2$  определяли, моделируя процесс трения стальными роликами на машине трения МИ-1М при нагрузках 2500, 5000 и  $8000 \text{ кг/см}^2$ . Рентгеноструктурный анализ поверхностей трения проводили на рентгеновском дифрактометре УРС-50М. Рентгенограммы дисульфидмолибденовой пленки снимали с образцов после испытаний при различных контактных давлениях, при этом съемку производили с трех различных участков каждого из образцов. Во всех случаях обнаружен один и тот же порядок расположения интерференционных максимумов, что свидетельствует о неизменности структуры исходного материала с ростом давления. При этом интенсивности от плоскостей типа (002)л) возрастает, а все другие уменьшаются, откуда следует, что в смазочном слое происхо-

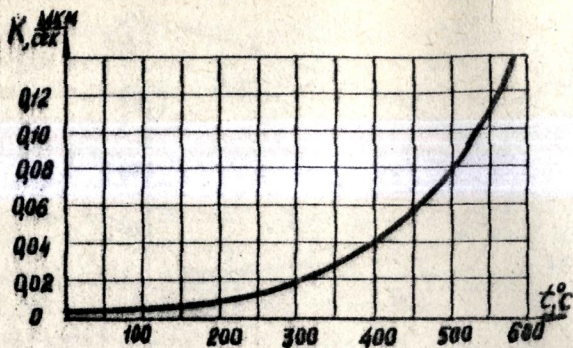


Рис.5. Изменение скорости реакции окисления (K) от температуры

дят изменения в пространственном расположении кристаллитов относительно друг друга и подложки.

Изучали изменение толщины смазочной пленки  $MoS_2$  в зависимости от числа циклов деформации (величины суммарного обжатия) и от степени однократного обжатия.

Внешнее трение при высоких контактных давлениях является граничным. В граничных слоях механические свойства определяются контактным давлением и толщиной. При недостаточной толщине смазочного слоя граничное трение переходит в полусухое.

В процессе пластической деформации проволоки толщина слоя смазки не остается постоянной. С уменьшением диаметра и увеличением длины заготовки по переходам волочения увеличивается поверхность проволоки, следовательно, смазка должна перераспределяться по новой увеличенной поверхности. Кроме того, часть смазки теряется по переходам волочения, и действительная величина смазочного покрытия уменьшается за счет потерь. Для расчета действительной толщины смазочного слоя по переходам необходимо знать закономерность и характер потерь.

Действительную толщину смазочного слоя определяли на рентгеновском дифрактометре JPC-50И по специально разработанной методи-

ке: рентгеноструктурным анализом и взвешиванием на точных электронных весах.

В основу метода положено: изменение интенсивности рентгеновского пучка в тонком слое пропорционально толщине этого слоя. Основные расчетные уравнения:

$$P_{(Cu+MoS_2)} = P - P_{Tr} = \pi d l (\rho_{Cu} \delta_{Cu} + \rho_{MoS_2} \delta_{MoS_2})$$

$$\ln \frac{I_{Tr}}{I} = \frac{2}{\sin \nu} (M_{MoS_2} \delta_{MoS_2} \rho_{MoS_2} + M_{Cu} \delta_{Cu} \rho_{Cu}),$$

- где  $P_{(Cu+MoS_2)}$  - вес смазки и подсмазочного медного покрытия;  
 $P$  - вес образца (проволоки) до травления;  
 $P_{Tr}$  - вес того же образца после травливания слоев;  
 $d, l$  - диаметр и длина образца;  
 $\delta_{Cu}, \delta_{MoS_2}$  - толщина слоя меди и  $MoS_2$ ;  
 $\rho_{Cu}, \rho_{MoS_2}$  - плотность слоев меди и  $MoS_2$ ;  
 $M_{Cu}, M_{MoS_2}$  - массовые коэффициенты поглощения меди и  $MoS_2$ ;  
 $I$  - интенсивности линии (211)  $\alpha Fe$  до травливания пленок;  
 $I_{Tr}$  - интенсивности этих же линий после травливания.

Интенсивности линий  $I_{Tr}$  и  $I$  определялись по рентгенограммам образцов проволоки после первого, третьего и шестого переходов волочения. Для уменьшения влияния случайных факторов вместо абсолютных значений  $I_{Tr}$  и  $I$  брали их отношение к интенсивностям линий эталона  $I_{Эт}$ . Окончательные выражения для расчета толщины смазочной пленки дисульфида молибдена и подсмазочного медного покрытия:

$$\delta_{MoS_2} \rho_{MoS_2} = \frac{B}{121} \cdot \frac{\sin \nu}{2} - \frac{79,8A}{121}$$

$$\delta_{Cu} \rho_{Cu} = \frac{209,8A}{121} - \frac{B}{121} \cdot \frac{\sin \nu}{2},$$

где  $A = \frac{P_{(Cu+MoS_2)}}{\pi d l}$ ;  $B = \ln \frac{I_{Tr}}{I}$ .

В результате рассчитаны значения толщины смазочного слоя и подсмазочного покрытия по переходам волочения и найдена их закономерность.

Потери смазки возрастают пропорционально числу циклов и величине суммарного обжатия.

Проведенные исследования позволили определить не только закономерность потерь смазки по переходам, но и аналитически посчитать эти потери. Для наиболее характерных производственных условий (обжатие 19-20%) выведены зависимости:

$$K_n = 0,2797 \left( \frac{d_0 - d_n}{\delta_{т.н.}} \right) \cdot 10^{-3},$$

где  $K_n$  - коэффициент, характеризующий долю потерь смазки по отношению к теоретической толщине на  $n$ -м переходе;

$d_0, d_n$  - диаметры проволоки первоначальный и на  $n$ -м переходе;

$\delta_{т.н.}$  - теоретическая толщина смазочного слоя.

$$\delta_{г.н.} = \delta_{т.н.} - 0,2797(d_0 - d_n),$$

где  $\delta_{г.н.}$  - действительная толщина смазочного покрытия.

Полученное уравнение при заданном маршруте волочения и первоначальной толщине смазочной пленки позволяет определить истинную толщину смазочной пленки. Задаваясь необходимой толщиной смазочного слоя на любом переходе, можно определить потребную для этого первоначальную толщину смазочного слоя дисульфида молибдена по уравнению:

$$\delta_0 = \frac{d_0}{d_n} [0,2797(d_0 - d_n) + \delta_{г.н.}].$$

Рентгеноструктурный анализ и точное взвешивание позволили определить изменение толщины смазочного слоя дисульфида молибдена в зависимости от величины единичного обжатия и показали, что потери смазки возрастают пропорционально величине обжатия. При этом установлено, что предварительное обжатие натертой пленки  $MoS_2$ , при котором нормальное давление не выходит за пределы упругой деформации материала подложки, уменьшает дальнейшие потери смазки по переходам волочения.

В процессе пластического трения одновременно с изменением толщины смазочного слоя происходят изменения и в его структуре.

Замечено, что для различных твердосмазочных покрытий постоянный коэффициент трения устанавливается не сразу, а через определенное время, называемое периодом приработки. Особенно характерно

явление приработки в случае применения чистого дисульфида молибдена. В этот период происходят изменения в расположении кристаллов  $MoS_2$  относительно друг друга и подложки - формирование текстуры смазочной пленки. Под текстурой понимается преимущественная ориентация кристаллов в определенном кристаллографическом направлении, в данном случае, параллельно плоскости скольжения.

В условиях пластической деформации возможны следующие варианты формирования смазочной пленки:

1. Образование устойчивой смазочной пленки на I-м переходе и совершенство ее текстуры при дальнейших циклах трения.

2. Частичное разрушение смазочной пленки при выходе на поверхность "свежего" металла с дальнейшим совершенством текстуры смазочной пленки по всей поверхности. Восстановление и формирование текстуры должно происходить за счет нетекстурированного объема. При этом степень совершенства текстуры по циклам трения должна возрастать, хотя и слабее, чем в I-м случае.

3. Полное разрушение подложки и, следовательно, смазочной пленки, и затем формирование новой смазочной пленки.

Так как полное разрушение поверхности трения за один цикл практически невозможно, наиболее вероятным должен быть второй вариант. Проведенные исследования позволили подтвердить эти предположения. Кроме того, изучалось влияние высокого давления в волоке на ориентацию кристаллов  $MoS_2$ .

Незначительная толщина смазочной пленки и малый радиус кривизны проволоки не позволяют составить полную картину ориентации кристаллов в виде полюсной диаграммы. Поэтому был применен количественный метод оценки, основанный на следующем. При изучении образцов на дифрактометре в формировании пучка дифрагированных лучей участвует один и тот же объем образца, причем отражение рентгеновских лучей происходит лишь от тех кристаллографических плоскостей, которые расположены параллельно плоскости скольжения. При образовании текстуры различные атомные плоскости из-за преимущественной ориентации имеют различную вероятность оказаться в отражающей плоскости. Как известно, интенсивность какой-либо линии на рентгенограмме от заданной фазы пропорциональна весовому содержанию или числу кристаллов этой фазы в облучаемом объеме. Поэтому относительная интенсивность интерференций, то есть интен-

сивность линий от атомных плоскостей, параллельных плоскости скольжения, будет возрастать, а остальные - падать.

Для оценки степени текстуры была выбрана линия  $(004) MoS_2$ , интенсивность которой  $J_{(004)}$  сравнивалась с интенсивностью от боковой грани кристалла  $(100) MoS_2 - J_{(100)}$ .

Рентгенограммы снимались на установке УРС-70 в камере РКД с образцов проволоки после различных суммарных и частных обжатий. Результаты показали, что ориентация заметна уже в пленке  $MoS_2$ , натертой вручную. Далее от первого к третьему переходу включителю число кристаллов, ориентированных плоскостью  $(004)$  параллельно плоскости скольжения, возрастает, а плоскостью  $(100) MoS_2$  - убывает, и отношение  $\frac{J_{(004)}}{J_{(100)}}$  возрастает. Следовательно, несмотря на особенности пластического трения, происходит рост текстуры смазочной пленки по переходам волочения. С увеличением частного обжатия значение интенсивностей  $J_{(004)}$  также возрастает, а интенсивностей  $J_{(100)}$  - уменьшается. Таким образом, степень текстуры в смазочной пленке возрастает в зависимости от числа циклов трения и нагрузки.

При хаотическом расположении кристаллов  $MoS_2$  в смазочном слое на сдвигообразование должно затрачиваться значительно больше усилий. Поэтому первоначальный период скольжения - период приработки - будет характеризоваться наличием значительных сил внешнего трения.

В четвертой главе диссертации изучается влияние смазки  $MoS_2$  на изменение свойств металлической подложки в процессе многократного пластического трения. Эти изменения связаны с наличием сил внутреннего трения в приповерхностных слоях деформируемого металла.

После снятия деформирующей нагрузки в металле остаются остаточные напряжения: упругие макронапряжения, микронапряжения блоков мозаики и искажения кристаллической решетки.

Распределение микроискажений в приповерхностных слоях проволоки изучали на образцах, протянутых на смазках: чистый  $MoS_2$ , натровое мыло и мыло с присадкой 7%  $MoS_2$  после первого, третьего и шестого переходов. Эффект истинного физического уширения от дисперсности блоков и микронапряжений оценивали измерением интегральной ширины дифракционных линий  $(2\theta) dFe$ , записанных на установке УРС-50. Результаты показали, что чем больше суммар-



ная степень деформации, тем выше уровень микроискажений и тем больше предел прочности  $\sigma_0$  деформируемого металла. Наиболее неравномерный характер в распределении микроискажений получен на шестом переходе. Дополнительная сдвиговая деформация при применении смазки  $MoS_2$  распространяется на меньшую глубину и градиент напряжений ниже, в то время как наклеп и величина предела прочности выше, чем при смазке мылом.

Количественная оценка величины блоков и микронапряжений, рассчитанных с применением гармонического анализа, подтвердила указанные зависимости: меньший размер блоков мозаики и большие микронапряжения наблюдаются при применении смазки  $MoS_2$ .

Остаточные макронапряжения получаются в результате воздействия в процессе деформации различных по знаку напряжений: растягивающих и сжимающих. Наиболее значительные по величине являются осевые остаточные напряжения  $\sigma_e$ , характеризующие величину дополнительной сдвиговой деформации — сил внутреннего трения. Эти напряжения определялись на образцах после первого, третьего и шестого переходов волочения на указанных выше смазках. Исследования проводились на специальной установке конструкции НИИМетиза. С проволоки стравливали концентрические слои. В результате перераспределения осевых остаточных напряжений в процессе стравливания проволока изменяет длину. Стравливая слой за слоем и измеряя длину и диаметр, по известной формуле Хейна определяли распределение осевых макронапряжений по сечению приповерхностных слоев.

Как показали расчеты, величина и характер распределения остаточных напряжений зависят от применяемой смазки. После шестого перехода осевые остаточные напряжения во всех образцах наибольшие и достигают  $25 \text{ кг/мм}^2$ . Наименьшая величина  $\sigma_e$  наблюдается при применении чистого  $MoS_2$ , здесь наименьший градиент напряжений по сечению. Наибольшая глубина проникновения деформации и градиент напряжений при смазке мылом. Полученные данные согласуются с результатами исследований микроискажений. Однако осевые остаточные напряжения зависят лишь от величины внешнего трения и не зависят от величины суммарного обжатия. Применение смазки  $MoS_2$  позволяет получить более равномерное распределение свойств по сечению проволоки и, следовательно, меньшую величину осевых остаточных напряжений.

Исследование механических свойств приповерхностных слоев проволоки методом микровдавливания позволили выявить суммарный результат воздействия напряжений при статическом трении. Воздействие сдвиговых деформаций вызывает упрочнение и приводит к увеличению твердости металла. По величине и характеру распределения микротвердости можно судить об упрочнении металла, о глубине проникновения деформаций и закономерностях внутреннего трения.

Исследовались образцы из стали 50 после первого и пятого переходов волочения при смазке обычным производственным мылом, мылом с добавкой 8%  $MoS_2$  и чистым  $MoS_2$ . Чтобы избежать влияния механической обработки, после обычной шлифовки и полировки образцы подвергались электрополированию.

Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3 алмазной пирамидой с углом при вершине  $136^\circ$ . Нагрузка на индентор составляла 50 грамм, погрешность измерения диагонали отпечатка - 0,3 мкм. Индентор перемещали перпендикулярно оси проволоки. Интервал измерения по сечению образца составлял 0,01 мм. В каждом интервале получали по 10 отпечатков. Твердость вычисляли по среднему значению.

Измерения показали значительное изменение микротвердости по сечению в зависимости от применяемой смазки. На первом переходе наибольшая твердость обнаружена на поверхности (градиент механических свойств отрицательный), что говорит о наличии значительных сил внешнего и внутреннего трения, связанных с периодом приработки.

После пятого перехода при применении смазки дисульфида молибдена и присадки  $MoS_2$  к мылу максимальную твердость имеет слой на глубине 0,01-0,02 мм, а поверхностный слой имеет значительно меньшую твердость. Это можно объяснить следующим образом. Ввиду высоких адгезионных свойств кристаллы дисульфида молибдена образуют прочное соединение с поверхностью металла, а поскольку связь между кристаллами слабее, трение локализуется в слое смазки. При этом подложка деформируется меньше, что препятствует образованию дефектов на поверхности. Твердость проволоки по сечению в приповерхностном слое при применении дисульфида молибдена выше, что подтверждает данные предыдущих исследований.

Производственные испытания смазки с присадками дисульфида молибдена проводили на Магнитогорском калибровочном заводе. Установлено, что оптимальное содержание  $MoS_2$  в натровом мыльном порошке находится в пределах 7-8% (при волочении на готовый размер до 3 мм). При этом значительно снижаются усилия волочения (до 12-14% на третьем переходе и до 8-10% на 5-м переходе), повышается предел прочности проволоки на окончательном размере до 10%. Важным показателем является стабильность работы волочильного стана, возможность повышения рабочих скоростей. Испытания стойкости волок на различных станах и различных размерах заготовок и проволоки показали увеличение стойкости волок в пределах от 20 до 100%. При этом значительно повысилась стойкость первого (обдирочного) и последнего (чистового) фильеров, которые при обычной смазке чаще других выходят из строя.

Производственные испытания канатов, изготовленных с применением присадки  $MoS_2$  (как при волочении, так и при свивке), показали значительное повышение срока службы, большую износостойкость, особенно в условиях статических нагрузок.

В конце диссертации дан расчет экономической эффективности применения присадки дисульфида молибдена в волочильном производстве и прилагаются акты внедрения и производственных испытаний.

## В ы в о д ы

Исследование трения в условиях высоких контактных нагрузок позволяет выявить основные закономерности и разработать рекомендации по применению твердых смазок, обеспечивающие повышение долговечности деталей и узлов трения.

1. В проведенных исследованиях установлены закономерности изменения коэффициента трения в присутствии смазки дисульфида молибдена при высоких контактных давлениях.

2. Дан анализ и теоретическая оценка внешнего трения при пластической деформации и найдены критерии видов нарушения фрикционных связей и порога внешнего трения с учетом свойств поверхностей трения и смазочной пленки дисульфида молибдена.

3. Применение дисульфида молибдена, как присадки к технологической смазке, повышает ее термическую стабильность и по-

зволяет увеличить величину обжатий при пластической деформации.

4. Установлены закономерности изменения толщины смазочного слоя дисульфида молибдена по циклам трения в зависимости от величины давления (обжатия), найдены аналитические зависимости для расчета потерь смазки.

5. Структура смазочной пленки на деталях при высоких нагрузках претерпевает существенные изменения. При циклических воздействиях в период приработки происходит образование текстуры смазочной пленки, связанное со значительной затратой сил внешнего трения, — ориентация кристаллов  $MoS_2$  плоскостями типа (002) параллельно поверхности трения. Степень текстуры прямо зависит от давления и числа циклов трения. С образованием текстуры уменьшаются силы трения и трение локализуется в тонком поверхностном слое.

6. Применение смазки дисульфида молибдена уменьшает глубину проникновения сдвиговой деформации от сил трения и обеспечивает положительный градиент механических свойств от поверхности, а при пластическом деформировании позволяет получить более равномерные свойства по сечению приповерхностных слоев, что снижает величину осевых остаточных напряжений, а также увеличивает прочность за счет большей величины упрочнения (микроскажения).

7. Проведенные исследования позволили распространить полученные результаты на технологические процессы, протекающие при высоких контактных давлениях. Производственные испытания показали, что применение смазки  $MoS_2$ , как присадки к мылу при волочении проволоки, повышает стойкость волоочильного инструмента, снижает величину усилия волочения, увеличивает прочность проволоки. Применение указанной смазки только на участке тонкого волочения (для диаметров проволоки 0,8–2,0 мм) при выпуске 50–60 тыс. тонн проволоки в год экономия составляет 360–440 тыс. рублей.

8. Применение дисульфида молибдена при волочении позволяет повысить долговечность и надежность канатной проволоки и канатов за счет повышения прочности и износостойкости.

В конце диссертации прилагаются акты испытания стойкости волок и износостойкости стальных канатов при применении смазки с присадкой дисульфида молибдена, а также акты внедрения этой смазки при волочении проволоки и фасонных профилей.

Диссертация содержит 152 страницы, из них 120 страниц чистого текста, 42 иллюстрации, 12 таблиц.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. А.Ф.Кармадонов, А.И.Брудный, В.А.Столярова. Исследование механических свойств стальной проволоки после волочения ее с дисульфидом молибдена. Повышение износостойкости деталей машин. Материалы научно-технической конференции. Хабаровск, 1972.
2. А.Ф.Кармадонов, В.А.Столярова, А.И.Брудный, Г.В.Баталов. Исследование смазочных свойств дисульфида молибдена в условиях высоких контактных давлений. Сб. Исследование износа с целью выявления путей повышения срока службы и качества выпускаемых машин. Материалы Всесоюзной конференции 23-25 ноября 1971 г., Москва.
3. А.Ф.Кармадонов, О.А.Рябчикова, Л.И.Фудим, В.А.Столярова, М.Г.Юнусов. Применение дисульфида молибдена в качестве смазки при волочении канатной проволоки. Сталь, №4, 1972.
4. А.Ф.Кармадонов, В.А.Столярова, А.И.Брудный. Исследование условий внешнего трения при обработке металлов давлением. Сб. Разработка и применение новых технологических смазок при обработке металлов давлением. Общество "Знание". УССР. Киев, 1972.
5. Применение дисульфидмолибденовой смазки при волочении стальной канатной проволоки. Сб. Разработка и применение новых технологических смазок при обработке металлов давлением. Общество "Знание". УССР. Киев, 1972.
6. А.Ф.Кармадонов, В.А.Столярова, А.И.Брудный. Исследование механических свойств стальной проволоки методом микротвердости после волочения с различными смазками. Материалы XXIII научно-технической конференции Челябинского политехнического института. Челябинск, 1970.
7. А.Ф.Кармадонов, В.А.Столярова, М.Г.Юнусов. Смазка дисульфидом молибдена канатной проволоки. Материалы XXIII научно-технической конференции Челябинского политехнического института. Челябинск, 1970.
8. А.Ф.Кармадонов, А.И.Брудный, В.А.Столярова. Влияние природы подсмазочного покрытия на процесс волочения со смазкой дисульфидом молибдена. Машиноведение и прикладная механика. Сб.

научных трудов Челябинского политехнического института. Челябинск, 1971.

Результаты работы докладывались:

1. На VI и VII Всесоюзных конференциях по разработке и применению технологических смазок при холодной обработке металлов давлением. Киев, 1971, 1972 гг.

2. На XXIII-XXV научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1970, 1971, 1972 гг.

3. На научно-технической конференции "Повышение износостойкости деталей машин". Хабаровск, 1971.

4. На Всесоюзной конференции "Исследование износа с целью выявления путей повышения срока службы и качества выпускаемых машин". Москва, 1971.

5. На Всесоюзных семинарах симпозиумах по проблемам прочности, надежности и долговечности стальных канатов. Одесса, 1970, 1971.

6. На заседании семинара Лаборатории теории трения Института Машиноведения 13 октября 1972 года. Москва.

Техн. редактор Л. С. Заварухина

---

ФБ 02133. 2/IV-73 г. Сдано в печать 3/IV-73 г. Формат  
бумаги 60x90 1/16. Объем 1,5 п. л. Отпечатано на рота-  
принте ЧПИ. Тираж 120 экз. Заказ № III/370.