

Министерство высшего  
и среднего специального образования  
РСФСР

Горьковский  
политехнический  
институт  
им. А. А. Жданова

*С. Н. Постников*

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ И РЕЗАНИИ**

Горький  
Волго-Вятское  
книжное издательство  
1975

6П4.6  
П63

УДК 537.44:621.9.01

Постников С. Н.

П63 Электрические явления при трении и резании. Горький, Волго-Вятское кн. изд-во, 1975.

280 с.

В монографии, отражающей современное состояние проблемы электрических явлений при трении, резании в твердых телах, излагаются экспериментальные факты, физические представления, методы и методы исследования тех электродинамических и электростатических процессов, которые протекают в специфических условиях взаимодействия твердых тел, характерных для трения и резания. Умение управлять такими процессами открывает широкие возможности для повышения износостойкости трущихся пар и режущего инструмента.

П 31361—163  
М146(63)—75

6П4.6

© Горьковский политехнический институт им. А. А. Жданова, 1975.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящей книге рассматриваются вопросы, относящиеся к проблеме повышения износостойкости трущихся пар и режущего инструмента, т. е. к одной из ключевых проблем современного машиностроения. С точки зрения физики она сводится к учету специфики взаимодействия твердых тел, имеющих свой химический состав и структуру, а также к умению управлять таким взаимодействием при самых различных условиях его протекания.

Действительно, и кинематическое трение и процесс обработки резанием можно рассматривать как непрерывное изменение энергии атомных и молекулярных взаимодействий в трехфазной граничной системе, в том числе в ее наиболее распространенном варианте *металл I — смазка — металл II*. При этом протекает целый комплекс взаимосвязанных физико-химических явлений: тепловых, сорбционных, электрических и т. д. То, какая часть механической энергии, сообщаемой фрикционной системе, преобразуется в другие виды энергии, зависит от типа связей между частицами на границе раздела фаз, в промежуточных слоях смазки и в поверхностных слоях твердых тел (металлов), подвергнутых упруго-пластическим деформациям. В свою очередь, явления, свойственные процессам трения и резания, способны влиять как на силу взаимодействия отдельных атомов и атомных коллективов, так и на сам характер связей. Они постоянно нарушают условия, в которых находится система, и вносят коррективы в тот путь, по которому она хотела бы вернуться в равновесное состояние. Такого рода вмешательство в конечном счете приводит к изменению макроскопических механических параметров: силы трения, работы резания и т. д. Естественно поэтому, что изучение специфики упомянутых явлений с одновременным поиском способов, позволяющих управлять механизмом их влияния на процессы трения и резания, имеет важное прикладное значение. Оно направлено на снижение трения, износа, сопротивления пластическим деформациям, работы по преодолению молекулярных сил при образовании новых поверхностей и т. п.

Приятно отметить, что при построении новых теорий трения все отчетливее проявляется тенденция опираться не на механические модели взаимодействия твердых тел, а на еще мало изученную категорию электрических и электромагнитных процессов, протекающих на атомном уровне. Этому в особенности способствует параллельное развитие представлений о роли электростатической компоненты адгезионной связи (Б. В. Дерягин,

А. Кротова, В. П. Смилга) и замечательных идей П. Н. Лебедева об излучении и поглощении электромагнитных волн взаимодействующими системами атомов (Е. М. Лифшиц, И. Е. Дзялошинский, Л. П. Питаевский). Исходя из указанных представлений была предложена и экспериментально подтверждена трехчленная формула трения, а также сделана попытка обосновать резонансный электромагнитный механизм диссипации энергии при внешнем трении (А. С. Ахматов, Г. Н. Учваткин, В. А. Буфеев). Процесс вынужденных колебаний эквивалентных осцилляторов трущихся тел положен и в основу элементарной теории трения, предложенной автором.

В последние два десятилетия внимательно изучались как физико-химические, так и технологические аспекты проблемы макроскопических электрических явлений, свойственных процессам трения и особенно резания.

Уже давно внимание специалистов было приковано к тому факту, что при этих процессах зона взаимодействия металлов и сплавов представляет собой горячий спай естественной термодины. Если внешнюю цепь такой термодины замкнуть, в ней потечет термоэлектрический ток. По величине электродвижущей силы источника можно оценить температуру в области фактического контакта тел. Что же касается самостоятельной роли термотока, выражающейся в его способности активно вмешиваться в сам ход упомянутых выше процессов, то она оказалась неожиданной.

В 1952 году П. Л. и С. Л. Гордиенко была впервые показана возможность уменьшения износа фрикционной пары путем замыкания ее внешней термоэлектрической цепи. В области резания металлов аналогичный способ, в основе которого лежит борьба с отрицательным влиянием термотока на стойкость инструмента, впервые нашел применение в Германии в исследованиях Х. Аксера и Г. Опфца (1953—1954 гг.), а несколько позже в работе Т. Хеенкампа.

В 1958 году В. И. Левиним и И. В. Гоголевым были предложены сверла, оснащенные пластмассовыми конусными хвостовиками (авторское свидетельство № 128 261). Изобретатели новой конструкции сверла объяснили их повышенную износостойкость прежде всего демпфирующим, виброгасящим действием пластмассового хвостовика, между тем именно последний играл роль своеобразного выключателя в термоэлектрической цепи *инструмент — деталь — станок — приспособление — инструмент*.

Инициаторами проверки обнаруженного эффекта с целью его широкого практического использования были М. Т. Галей и А. А. Аваков (1962—1963 гг.). Большой вклад в дело экспериментального апробирования нового способа в лабораторных и производственных условиях сделан В. А. Бобровским (авторское свидетельство № 206 972). Сущность изобретения В. А. Бобровского сводится к предложению использовать для замыкания термо-

электрической цепи, горячим спаем которой является зона резания, так называемые склеенные приспособления. По виду это все те же оправки, втулки и т. п., однако они собраны на клею из двух частей, причем слой клея как раз и предназначен для того, чтобы изолировать инструмент от станка в электрическом отношении. Склеенные приспособления просты в изготовлении и по сравнению с ранее применявшейся оснасткой (например, текстолитовыми втулками) обладают высокой жесткостью, что приводит, по данным В. А. Бобровского, к дополнительному увеличению стойкости инструмента примерно на 20%, в то время как сам акт замыкания цепи термотока может дать при тех же условиях обработки увеличение стойкости в два и более раза.

Дальнейшей популяризации нового способа способствовали работы целого ряда других исследователей, показавших существенное влияние электрических явлений на стойкость режущего инструмента, на чистоту обработанной поверхности, на износ трущихся материалов.

Параллельно, начиная с 1965 года, проводились исследования смежного круга явлений, связанных с влиянием на процесс резания металлов магнитного состояния инструмента (Г. И. Якушин, М. Т. Балабеков и др.). Совсем недавно в работах автора с сотрудниками была показана возможность магнитоэрозионного упрочнения и магнитодисперсионного твердения быстрорежущей стали путем ее магнитной обработки, что является новым резервом повышения износостойкости инструмента.

Первое научно-техническое совещание, посвященное проблеме электрических явлений при трении и резании металлов и их практического использования, состоялось в 1967 году. Оно было организовано Научным советом по теории машин и рабочих процессов АН СССР совместно с Государственным научно-исследовательским институтом машиноведения и Комиссией по технологии машиностроения. Доклады, представленные на этом совещании, составили основное содержание сборника [1]. Совещание послужило толчком к развитию исследований, конечная цель которых сводится к эффективному использованию электрических явлений для получения подробной информации о специфических процессах взаимодействия твердых тел и управления такими процессами.

Второе аналогичное совещание, проведенное, как и первое, по инициативе профессора М. М. Хруцова, состоялось в 1969 году. В материалах этого совещания согласованно подтверждается весьма существенная роль электрофизических процессов в специфических условиях взаимодействия твердых тел [2]. Однако как первое, так и второе совещания отчетливо показали крайнюю сложность изучаемых явлений и необходимость их более глубокого и систематического исследования.

На фоне противоречивых экспериментальных данных, которые не могли быть систематизированы на основе имеющихся ка-

чественных интерпретаций, стала очевидной и преждевременность некоторых рекомендаций по использованию электрических явлений. С сожалением приходится констатировать, например, что тенденция внедрять склеенные приспособления практически во всех случаях обработки металлов резанием привела к ненужным материальным затратам. Только при научно обоснованном применении таких приспособлений можно получить результаты, позволяющие рассматривать электроизоляцию инструмента как мероприятие большого экономического значения.

Благодаря интенсивному развитию нового научного направления круг организаций и специалистов, занимающихся изучением электрических явлений при трении и резании, стал несравненно шире. Значительно расширился и круг вопросов по данной проблеме, что связано с открытием Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским явления избирательного переноса. Использование этого явления, имеющего, по сути, электрохимическую природу, открыло широкие возможности для создания более совершенных фрикционных систем и применяемых в них эффективных средств смазки.

Результаты новейших исследований в области электрических явлений при трении и резании металлов обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции, состоявшейся в 1973 году в г. Одессе [3]. Была подчеркнута актуальность разработки таких, например, вопросов, как механизм образования и свойства граничных слоев, имеющих доменную структуру (М. М. Спичковский, В. Н. Юрьев и др.), трибоэлектрические явления в системах, содержащих новые материалы на основе пластических масс (Г. А. Георгиевский, Л. А. Лебедев и др.), влияние поляризации на кинетику электрохимических процессов при трении и свойства поверхностных структур (А. И. Портер, Г. А. Преф и др.) и т. д.

Вошедшие в книгу работы автора, участника названных совещаний и конференции, относятся к последнему десятилетью. Они проводились в подразделении Кавендишской лаборатории Кембриджского университета — Лаборатории физики и химии твердых тел, на кафедре металлорежущих станков и инструментов Горьковского политехнического института им. А. А. Жданова и в основном (1966—1974 гг.) — на кафедре физики того же института в сотрудничестве с рядом предприятий г. Горького. Естественно, что автор стремился придать книге характер монографии, излагающей текущее состояние вопроса. Однако ее содержание претендует на сколько-нибудь полный охват экспериментального материала, имеющегося в литературе, и сосредоточено во круг проблем, относящихся к сфере интересов автора и смежным с ней областям.

## ВВЕДЕНИЕ

Проникновение межмолекулярных сил связано с электростатическим притяжением или отталкиванием электронов и ядер, с наличием электродинамических, магнитных и валентных (обменных) межатомных сил. В этом смысле почти все явления, протекающие, например, в системе *металл I — смазка — металл II*, относятся к категории электрических. Однако статистическое суммирование атомных (электронно-ионных) и молекулярных взаимодействий, когда они резко отличаются друг от друга по своей физико-химической природе, не представляется сейчас возможным. В то же время с развитием и обобщением представлений о донорно-акцепторном характере связи между атомами, молекулами или функциональными группами [4], а также представлений об электромагнитной природе ван-дер-ваальсовых взаимодействий конденсированных фаз [5] не могла оставаться на месте и физическая теория трения. При раздельном учете молекулярного сцепления граничных слоев и неконтактной адгезии твердых тел как результата взаимодействия флуктуаций их электромагнитных полей оказалось возможным уточнить двучленный закон трения [6] и впервые доставить опыты по измерению удельных сил притяжения между металлами, разделенными слоем граничной смазки [7]. Представление об электромагнитном характере силового приповерхностного поля конденсированных фаз лежит в основе и совсем недавно высказанной точки зрения о резонансно-избирательном механизме диссипации энергии, осуществляемой эквивалентными осцилляторами трущихся тел [8]. Именно эта идея, несмотря на то что в сам механизм резонансных потерь был вложен принципиально иной смысл, послужила для автора одним из отправных моментов при разработке новой теории трения [9], построенной по аналогии с классической теорией дисперсии света и излагаемой в главе 1.

Фактический вид приповерхностного поля твердой фазы зависит от реальной кристаллической структуры, определяемой дефектами решетки. В свою очередь, дефектность сопряженных кристаллических решеток при трении зависит от величины поверхностной энергии на границе раздела фаз. Используя модель металла в виде ионной решетки, погруженной в электронный газ, можно оценить то изменение энергии, которое происходит при одновременном давлении электронных газов на границу раздела металлов со стороны каждого из них. Было показано, что в металле с меньшим химическим потенциалом эффект пластификации поверхностного слоя должен быть выражен сильнее [10].

Характер контактного взаимодействия поверхностей непосредственно связан с их энергетическим состоянием. Этим и определяется ценность информации, получаемой при измерениях работы выхода, точнее — контактной разности потенциалов по отношению к стандартному электроду. С помощью таких измерений, например, установлено существование корреляционных связей между работой выхода электрона и параметрами граничного трения [11]. Первая часть главы II как раз и посвящена вопросу о том, каким образом и почему происходит изменение работы выхода в результате физико-химического модифицирования поверхности твердого тела. При этом специальное рассмотрение, проведенное для случая искажения электронного энергетического спектра металла при его пластической деформации, позволило подробно остановиться на результатах, полученных при исследовании экзотермической эмиссии, вызванной трением [12].

Для того чтобы в вопросе об особенностях протекания термоэлектрических и электрохимических явлений при трении (резании) металлов достичь по возможности наибольшей степени ясности, в главе II охарактеризованы основные источники э. д. с. и некоторые из факторов, предопределяющих электрическое состояние межфазной границы раздела. Отмечен гистерезис кривых электрической проводимости контакта при циклических изменениях нагрузки, отражающий предрасположенность элементов пары к адгезии и взаимному растворению [13].

Для изучения макроскопических трибоэлектрических явлений, проявление и практическая значимость которых становятся все более очевидными, удобно, как это и было предложено автором [14], обращаться к синтезу схем вольтовых электрических цепей с переменными параметрами, отвечающих любому из состояний фрикционного контакта. Действительно, такое электрическое моделирование, охватывая, как видно из глав II, III и IV, самые разнообразные случаи, оказалось почти универсальным; в то же время выбор конкретного варианта схемы и возможность ее расчета зависят от типа и свойств фрикционной системы, параметров и направленности процесса. С помощью эквивалентной электрической схемы трехфазной фрикционной системы, упрощенный вариант которой поддается несложному расчету, можно, например, количественно оценивать, насколько изменяется фактическая площадь контакта и усредненная толщина смазочной прослойки в процессе трения металлов. Такая оценка позволяет прогнозировать работу скользящих контактов в различных смазочных средах и способствовать реализации условий, благоприятных для избирательного переноса [15]. Анализ указанной схемы был также использован в другом плане — при разработке метода оценки несущей способности смазочных пленок путем автоматизированного статистического контроля величины интегральной э. д. с. [16—19]. С помощью этого мето-

да, в частности, удалось выявить различие в смазочных свойствах жидкостей, содержащих соли дикарбоновых кислот. Оказалось, что их способность выполнять смазочную функцию возрастает пропорционально молекулярному весу гомологов. Согласно полученным результатам влияние размеров углеродной цепи на вязкость граничных адсорбционных слоев может быть весьма значительным. Тем самым зависимость дерягинского расклинивающего давления от длины цепных полярных молекул находит косвенное экспериментальное подтверждение (гл. III).

Эффект электрической изоляции инструмента при обработке гаммы жаропрочных нержавеющей сталей побудил исследователей начать всестороннее изучение термоэлектрических явлений, протекающих при резании металлов. Сейчас мы располагаем экспериментальными данными, иногда, впрочем, довольно отрывочными, которые позволяют судить о параметрах термоэлектрической цепи *инструмент — деталь — станок*, о локальных термотоках в зоне резания, о преобладающем типе проводимости сплавов, их удельной термо-э. д. с. и т. д. Получили развитие начатые автором работы по изучению амплитудно-частотного спектра переменной составляющей разности потенциалов между инструментом и обрабатываемой деталью [20], что нашло отражение в главе IV. Между тем одна из основных задач электрофизики трения и обработки резанием — раскрыть механизм влияния термоэлектрических явлений на процессы взаимодействия тел в специфических условиях скольжения — по-прежнему остается до конца не решенной хотя бы в самом первом приближении. Любое из известных объяснений преобладающей разрушительной функции термотока — оказывает эрозионное действие на трущиеся поверхности [21, 22], изменяет кинетику окислительных процессов в местах контакта инструмента со стружкой и изделием [23, 24], выступает в качестве стимулятора упрочнения адгезивно-когезионного шва [25, 26], ускоряет процесс диффузионного распада инструмента [27, 28] — носит гипотетический характер. Поэтому в главе V дается краткий анализ упомянутых здесь гипотез и обсуждается вопрос о факторах, предопределяющих проявление эффекта электрической изоляции инструмента [29]. С учетом этих факторов, как удалось показать на примере обработки титановых сплавов сверлами из быстрорежущей стали, можно искусственно создавать такие экспериментальные ситуации, при которых размыкание термоэлектрической цепи приводит к ожидаемым результатам. Получила обоснование зависимость флуктуаций температуры в зоне контактного взаимодействия от изменения электрического сопротивления цепи термотока, определяющего тепло Пельтье и величину джоулевых потерь, что в конечном счете сказывается на прочности адгезивно-когезионного шва.

Естественно, что использование склеенных устройств при резании диэлектрических материалов казалось лишеным смысла,

поскольку сам диэлектрик является изолятором. Как выяснилось [30], однако, применение новой технологической оснастки может оказаться целесообразным и в случае обработки диэлектриков, что, по-видимому, связано с электрической изоляцией инструмента от Земли (от заземленного станка). Об эффекте «отключения Земли» сообщается в главе VI, посвященной трибоэлектрическим явлениям в парах *металл — диэлектрик*.

Предмет главы VII составляют результаты исследований того влияния, которое оказывает на стойкость быстрорежущего инструмента его магнитная обработка. Отмечено [31], что наиболее вероятными физическими причинами улучшения свойств быстрорежущей стали под воздействием импульсного магнитного поля могут быть процессы магнитострикционного упрочнения и магнитодисперсионного твердения. Рассмотрены механизмы этих процессов. Путем сопоставления магнитных динамических характеристик некоторых инструментальных сталей показана целесообразность сравнения материалов по величине тепловой энергии, выделяемой в них вихревыми токами при резании намагниченным инструментом.

Одна из целей этого краткого вводного очерка состояла в том, чтобы у читателя, мало знакомого с развитием нового научного направления, не осталось ни малейшего сомнения в перспективности изучения электрических явлений при трении и резании. Автор хотел бы надеяться, что эта цель достигнута.

## Глава I

### НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РОЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ КОНТАКТЕ И ТРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

#### § 1. Электростатическая и электромагнитная компоненты адгезии

Сопротивление движению, которое возникает при относительном скольжении конденсированных фаз, зависит от адгезии их поверхностей. Принимая во внимание терминологический произвол, имеющийся в литературе при определении адгезии, поясним тот смысл, который вкладывается в этот и ряд других терминов, встречающихся в данной работе.

Об адгезии двух тел мы говорим прежде всего тогда, когда при приведении их в контакт индивидуальность границы раздела между телами остается четко выраженной. Сохранение границы раздела наблюдается практически всегда, когда два разнородных тела взаимодействуют в условиях, исключающих возможность их схватывания и диффузионного упрочнения контакта.

Согласно [4], если притяжение тел как неизбежный атрибут адгезии обусловлено силами химического средства гетерополярной природы, то поверхность раздела приобретает свойства двойного электрического слоя. Чем сильнее выражен донорно-акцепторный характер связи, тем отчетливее проявляет себя электростатическая компонента адгезии. Частным случаем такого проявления является притяжение зарядов двойного электрического слоя (микроконденсатора), образованного при контакте кристаллических тел, которые с принципиальных позиций можно рассматривать как гигантские молекулы.

Надо, однако, заметить, что и в случае гомеополярной связи, отличающейся сохранением симметрии в электронной плотности, природа адгезии тел остается по-прежнему электрической, только теперь причина возникновения межатомного притяжения кроется не в кулоновском взаимодействии, а в особом квантово-механическом эффекте, вызывающем переход электронов с атомных на энергетически более выгодные молекулярные «орбиты».

Адгезионный шов представляет собой двухмерный протяженный дефект, принадлежащий обоим граничащим структурам. Если эти структуры оказываются в условиях, при которых граница

раздела между ними становится размытой, то правильнее, вероятно, говорить уже не об аттракционном взаимодействии двух тел, а об образовании между ними третьего, «сцепляющего» тела, наделенного своим химическим составом, структурой и свойствами. Такого рода трехмерный протяженный дефект имеет скорее не адгезионную, а когезионную природу; мы будем называть его «когезионным швом». Наиболее типичными процессами, приводящими к появлению когезионного шва, являются: диффузионное срастание совместимых полимеров, диффузионное сваривание стекол и, что особенно важно для нас в дальнейшем, диффузионное спекание металлов (с момента исчезновения границы раздела между сопряженными кристаллическими решетками).

Развивая предложение авторов работы [4], согласно которому процесс установления связи между двумя телами и количественная мера его результата обозначаются соответственно терминами «прилипание» и «адгезия», мы можем процесс упрочнения адгезионного контакта назвать «сцеплением», а количественную меру его результата — «когезией». Как видим, само образование когезионного шва предполагает существование адгезионного контакта и возможность участия двойных электрических слоев в ускорении процессов сцепления, диффузионных по своему характеру. Ясно, что процесс перехода от адгезионного шва к когезионному является необратимым: появление нового адгезионного шва неизбежно связано с разрывом системы, происходящим в любом из тел по поверхности, характеризующей наименьшей энергией связи.

Использование приведенной выше терминологии не следует рассматривать как тенденцию абсолютизировать различие явлений прилипания (адгезии) и сцепления (когезии). Разрыв граничных смазочных слоев, например, считается «чисто когезионным» лишь в том случае, когда он происходит при достаточно большой толщине слоя в той его области, на которую не распространяется влияние сторонних полей твердых фаз [32]. Если же под действием этих полей изменения в молекулярной структуре граничного слоя охватывают весь его объем, то механизм межмолекулярных когезионных взаимодействий в виде ван-дер-Ваальсовых, водородных или химических связей становится более сложным благодаря именно «чисто адгезионным» эффектам, например адсорбционному притяжению между металлом и головными группами полярных молекул, адаптированных на его поверхности.

Таким образом, в самом общем случае контактного взаимодействия шероховатых тел в присутствии смазки между ними является смешанный адгезионно-когезионный шов, причем удельный вклад в его образование процессов прилипания и сцепления определяется физико-химической природой составных элементов системы и теми условиями, в которых она находится.

Оставляя пока в стороне процессы диффузионного упрочнения связей, необходимо подчеркнуть, что из сил химического средства гетерополярные силы встречаются при трении значительно чаще, чем чисто гомеополярные. Поэтому, как нам представляется, электронная теория адгезии [33, 4], раскрывающая особую роль донорно-акцепторного взаимодействия при контакте двух поверхностей и уходящая своими корнями в электрическую теорию адгезии [34], имеет большой эвристический потенциал в области физики трения.

Основополагающим звеном этой теории является возможность феноменологического подхода к описанию донорно-акцепторной связи с применением методов статистики. В самом общем аспекте идея такого подхода весьма проста: вместо того чтобы находить волновую функцию гетерополярной молекулы и распределение в ней электронной плотности, предлагается решать аналогичную задачу — изучать перераспределение плотности электронного газа при контакте твердых тел. Практически это означает замену сложнейших квантомеханических расчетов относительно простыми расчетами двойных электрических слоев с использованием макроскопического приближения плоского конденсатора. Остановимся на этом подробнее.

Макроскопическое усреднение электрического поля сводится в данном случае к допущению, что заряды, которые, строго говоря, всегда занимают известный объем, сосредоточены на «тонких» (по сравнению с их расстоянием от исследуемых точек поля) поверхностях с постоянной плотностью  $\sigma$ . Это позволяет определять силу взаимодействия двух разнородных тел как силу притяжения обкладок конденсатора на единицу площади

$$f_e = 2\pi\sigma^2 \quad (1.1)$$

(для простоты не учитывается множитель, выражающий некоторое усредненное значение относительной диэлектрической проницаемости).

Действительная картина строения двойного слоя, конечно, намного сложнее. Результатом донорно-акцепторной реакции является образование системы диполей, ориентированных перпендикулярно границе раздела. Значит, на каждой из контактирующих поверхностей возникает дискретная структура, состоящая из одноименных зарядов. Полагая поверхности однородными и идеальными, что равносильно требованию образования зарядами правильных паркетных структур, авторы получают следующую формулу для удельной силы адгезии:

$$f_e = e \sum_{i,k} E_x(x_i, y_k), \quad (1.2)$$

где  $x_i, y_k$  — координаты заряда одной из заряженных плоскостей;  $E_x(x_i, y_k)$  — поле, создаваемое всеми противоположными по знаку зарядами другой плоскости в данной точке. Поскольку на

заряд с любыми координатами  $x_i$  и  $y_k$  действует одно и то же поле,

$$f_z = \sigma E_z(x_i, y_k). \quad (1.3)$$

Если  $a_1, a_2$  — постоянные плоских решеток зарядов и  $z$  — расстояние между этими решетками, то при  $z \gg a_1 \sim a_2$  истинное поле, представляющее собой периодическую функцию с периодами  $a_1$  и  $a_2$ , будет приближаться к однородному полю равномерно заряженной плоскости  $\langle E_z \rangle = 2\pi\sigma$ . В случае же  $z \ll a_1 \sim a_2$  можно пренебречь действием на данный заряд всех зарядов противоположной решетки, кроме ближайшего. Тогда

$$f_z = \frac{z}{z^2} = \frac{ne^2}{z^2}, \quad (1.4)$$

где  $n$  — число пар зарядов на единицу площади.

Несмотря на то что из-за вышеуказанных допущений приближенные оценки значения  $f_z$  дают заниженные результаты, особенно при макроскопическом усреднении поля, на основе приведенных формул удается раскрыть качественные закономерности адгезии, в чем и состоит ценность теории.

Теоретическое исследование электростатической компоненты адгезии предполагает расчет плотности зарядов двойного слоя, возникающего при контакте разнородных тел. Принимая во внимание, что для усредненного распределения зарядов количественные оценки сил адгезии могут быть более или менее правильными лишь при  $z \sim 10-100 \text{ \AA}$  и выше и что такие эффективные толщины приповерхностного двойного слоя характерны для полупроводника, авторы выбирают последний в качестве основного объекта исследования. Расчеты выполняются в рамках метода самосогласованного поля. Если предположить, что плотность объемного заряда и заряд поверхностных состояний в полупроводнике являются функциями только электростатического потенциала, то уравнение Пуассона — Больцмана можно свести к квадратурам.

Рассматривая, например, случай контакта металл — полупроводник с произвольным спектром поверхностных состояний, когда полупроводник отделен от металла микроскопическим зазором  $d$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_s$ , авторы получают следующее выражение для поля в зазоре:

$$E_z = \frac{\epsilon_s kT}{\epsilon_s \epsilon_L D} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_L} \int_0^{\tilde{\varphi}_n} \sigma(\tilde{\varphi}_n) d\tilde{\varphi}_n + \frac{4\pi}{\epsilon_s} \sigma(\tilde{\varphi}_n)}, \quad (1.5)$$

где  $\tilde{\varphi}_n = \frac{e\varphi_n}{kT}$  — безразмерная потенциальная энергия электрона ( $\varphi_n$  — потенциал поверхности);  $\sigma(\tilde{\varphi}_n)$  — заряд поверхности;

$n_1$  — средняя концентрация носителей, характерная для данного полупроводника;  $L_D = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_1}{\epsilon_s kT}}$  — дебаевская длина;  $\epsilon_s$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника. Очевидно, что электростатическая слагающая силы адгезии

$$f_z = \epsilon_s E_z^2 / 8\pi. \quad (1.6)$$

Конкретизируя модель спектра поверхностных состояний и фактически сведя ее к учету лишь двух сортов поверхностных уровней — донорных и акцепторных, авторы показали, что на границе металл — полупроводник могут возникать электрические поля того же порядка, что и при контакте металлов ( $10^7 \text{ В/см}$ ). Появление сильных полей, обеспечивающих значительную адгезию, является характерным для полупроводников с большим числом поверхностных состояний — поверхность таких полупроводников становится как бы металлизированной. Она оказывается хорошим резервуаром для отрицательных или положительных зарядов, если на ней (еще до контакта с металлом) преобладали соответственно акцепторные или донорные центры, и превращается из электрофильной в электрофобную<sup>1</sup> при перекрестной ситуации. Поэтому, чтобы ослабить адгезию, необходимо ориентироваться на такую комбинацию металла с полупроводником, при которой работа выхода у полупроводника с насыщенными донорами или акцепторами поверхностью была бы соответственно больше или меньше, чем у металла.

Мы не будем останавливаться на других результатах теоретического исследования и, в частности, на закономерностях поведения удельной силы адгезии для случая полупроводниковой прослойки, заключенной между металлами, хотя этот случай, как легко убедиться в дальнейшем, представляет особый интерес. Точно так же, отсылая читателя к монографиям [4] и [35], не будем здесь приводить и многочисленных экспериментальных доказательств электрической природы адгезионно-когезионного шва. Заметим только, что к наиболее убедительным подтверждениям фундаментальной роли двойных электрических слоев в явлениях адгезии относится эмиссия быстрых электронов при нарушении контакта в вакууме, обнаруженная Карасевым, Кротовой и Дерягиным еще в 1952 году.

Обратимся теперь к вопросу о происхождении неконтактной адгезии. По сравнению с силами короткого радиуса действия на участках истинного контакта силы неконтактной адгезии являются дальнедействующими и характеризуют притяжение конденсированных фаз на участках поверхностей, относящихся к разности между номинальной  $S_n$  и фактической  $S$  площадями контакта. Природа этих молекулярных сил может быть рас-

<sup>1</sup> Мы распространяем на полупроводники терминологию, предложенную для диэлектриков В. Р. Харпером (гл. VI, § 2).



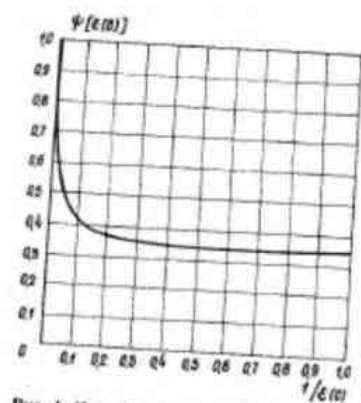


Рис. 1. К теории взаимодействия конденсированных фаз (по Е. М. Лифшицу)

крыта по Лебедеву — Лифшицу в свете представлений об излучении и поглощении электромагнитных волн взаимодействующими системами атомов.

Спонтанное излучение с поверхности твердого тела обусловлено флуктуациями плотности электронных облаков атомов, находящихся в суперпозированном состоянии. Известно, что для любого из таких атомов, оказавшись он изолированным, среднее значение электрического момента, изменяющегося со временем, равно нулю. При сближении электронных облаков возникает корреляция флуктуаций их плотности, благодаря чему в каж-

дом из атомов появляется наведенный электрический момент. Притяжение наведенных диполей и регулирует весь последующий процесс коллективизации атомов (вспомним, например, конденсацию газов при низких температурах). В результате объединения атомов, придающего флуктуациям направленный характер, конденсированное тело в целом становится источником флуктуационного электромагнитного поля.

Нетрудно видеть, что взаимное притяжение двух конденсированных фаз удобно опять (как и в случае донорно-акцепторной связи) рассматривать с точки зрения взаимодействия двух гигантских молекул. Корреляция флуктуаций электромагнитных полей, излучаемых такими молекулами, и является ключом к пониманию природы пондеромоторных ван-дер-ваальсовых сил, ответственных за неконтактную адгезию.

В теории межфазного граничного поля показано [36], что при достаточно большом расстоянии<sup>1</sup> между поверхностями однородных тел величина электромагнитной составляющей силы адгезии, как функция этого расстояния, зависит только от значения диэлектрической проницаемости среды в стационарном (электростатическом) поле:

$$f_m = \frac{\pi^2}{240} \frac{\kappa \epsilon}{H^4} \left[ \frac{\epsilon(0) - 1}{\epsilon(0) + 1} \right]^2 \psi[\epsilon(0)], \quad (1.7)$$

где функция  $\psi[\epsilon(0)]$  может быть задана графиком, полученным путем численного интегрирования (рис. 1).

<sup>1</sup> По сравнению с основными длинами волны спектра поглощения (испускания) вещества.

Для металлов  $\epsilon(0) = \infty$ , следовательно,

$$f_m = \frac{\pi^2}{240} \frac{\kappa \epsilon}{H^4} = \frac{0,013}{H^4} \text{ (дн/см}^2\text{)} \quad (1.8)$$

(при  $H$ , выраженном в микронах)<sup>1</sup>.

Макроскопическая теория Лифшица, в которой удалось избежать искусственного допущения об аддитивном характере ван-дер-ваальсовых сил, нашла прямое экспериментальное подтверждение в работах Дерягина и Абрикосовой (рис. 2).

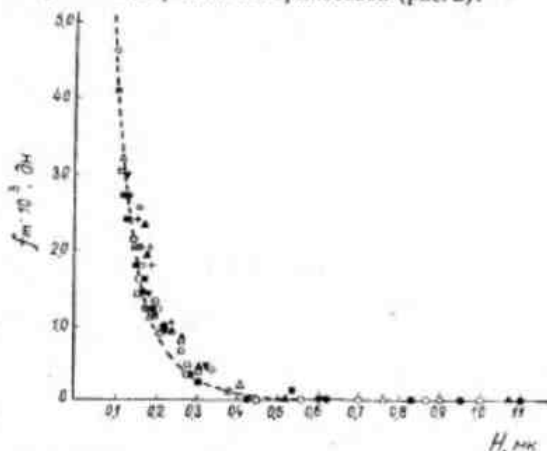


Рис. 2. Зависимость силы молекулярного притяжения между линзой радиусом 26 см и пластиной из плавящего кварца от расстояния между ними (по Б. В. Дерягину и И. И. Абрикосовой). Пунктир соответствует теоретической кривой (по Е. М. Лифшицу) [5,32]

Вполне возможно, впрочем, что даже в условиях радиоактивного или ультрафиолетового облучения, применявшегося авторами с целью ионизации воздуха, электризация кварцевых поверхностей не была устранена полностью. Плавящийся кварц относится к классу электрофильных диэлектриков, поэтому опытные данные, полученные с его использованием, могли выражать действие пондеромоторных сил смешанного характера, как молекулярных, так и электрических.

После вышесказанного становится ясным, что обе рассмотренные компоненты адгезии — электростатическая и электромаг-

<sup>1</sup> Этот частный результат (только для случая проводящих тел) был ранее получен Х. Казимиром [37].

нитная — должны быть учтены как составляющие суммарной силы аттракции в двучленном законе трения. К этому мы и переходим, ограничиваясь лишь кратким вступлением, посвященным побочному для нас случаю трения качения.

## § 2. Роль электроадгезионных сил в процессах трения

Не остановиться на необходимости учета электроадгезионных сил при трении качения нельзя уже потому, что в тех случаях, когда энергетические потери на упруго-пластическое деформирование и взаимное проскальзывание контактирующих тел пренебрежимо малы, трение, как сопротивление перекатыванию одного тела по поверхности другого, обязано прежде всего проявлению вышеуказанных сил, имеющих далекодействующий характер. Если скорость, с которой расходитсся адгезионный шов, велика, то удельная работа по преодолению сил электростатического притяжения между обкладками двойного слоя может достигать больших значений. Это объясняется тем [4], что при слабой утечке зарядов, а тем более при полном ее отсутствии процесс разделения обкладок двойного слоя является термодинамически неравновесным: разность потенциалов между обкладками возрастает во много тысяч раз по сравнению с ее равновесным значением (порядка вольт), что и затрудняет нарушение контакта. Согласно теории электростатической компоненты трения качения, подробно излагаемой в [4], увеличение тормозящего момента за счет именно этой слагающей связано с асимметричным распределением зарядов относительно средней линии контакта, представляющей собой мгновенную ось вращения тела (например, цилиндрической формы), суммарный заряд которого в установившемся режиме остается постоянным. Указанная асимметрия возникает из-за того, что как рекомбинация обкладок двойного электрического слоя, так и их появление во вновь образовавшейся контактной зоне происходят с некоторым запаздыванием по отношению к кинетическим процессам расхождения и сближения поверхностей. Совершенно очевидно, что форма и скорость рекомбинации зарядов зависят от поверхностной проводимости контактирующих тел и скорости разделения обкладок двойного слоя. Малая проводимость тел и большая скорость качения являются необходимыми предпосылками для появления таких «перенапряжений», при которых развивается газоразряд. В противоположной ситуации (большая проводимость, малая скорость) возможность газоразрядных явлений практически исключена и рекомбинация, как, впрочем, и зарядение, происходит либо в области непосредственного контакта, либо, что менее существенно, за счет туннельного эффекта. О физической обоснованности принципиально нового механизма трения каче-

ния говорит тот факт, что для него характерны те же самые явления, которые наблюдаются при обычном адгезионном отрыве: газоразрядное свечение, эмиссия высокоэнергетических электронов, рентгеновское излучение (как результат торможения быстрых электронов в полях атомов вещества) и т. д. Больше того, экспериментальное исследование показало, что отмеченная аналогия распространяется не только на сами электроадгезионные явления, но и на функциональные зависимости, их описывающие [38].

Проявление донорно-акцепторного взаимодействия тел в том виде, как это имеет место при чисто адгезионном типе отрыва, встречается и при внешнем трении скольжения. Мы имеем в виду процесс, сопровождаемый вибрационными отскоками индентора. О значении электрических явлений, обусловленных фрикционными колебаниями, речь пойдет ниже (гл. V, § 1); здесь же предлагается обобщенный вариант записи двучленного закона трения с учетом некоторых соображений, изложенных в предыдущем параграфе.

В молекулярной теории Дерягина, конкретизирующей характер связи сил трения и адгезии [39], трение поликристаллических тел рассматривается на основе статистики парных взаимодействий монокристаллов, причем решающая роль в элементарном акте трансляции отводится силам борновского отталкивания электронных оболочек атомов. При относительно скольжении атомных систем, будь то внешнее трение или внутренние пластические сдвиги, состояние фрикционного контакта с учетом молекулярной шероховатости поверхностей выражается силовым многоугольником (рис. 3), где  $N$  — нормальная нагрузка;  $P$  — равнодействующая сил молекулярного притяжения;  $R$  — равнодействующая сил отталкивания;  $F$  — сила трения. Полагая атомы и молекулы телами неизменной формы, истинный коэффициент трения можно представить как отношение тангенциальной и нормальной составляющих реакции нижней поверхности (кристаллографической плоскости):

$$\mu = R_{\tau} / R_n \quad (1.9)$$

Пренебрегая тангенциальными составляющими сил притяжения, автор считает силу трения равной  $R_{\tau}$ :

$$F = \mu R_n = \mu (N + P_n) \quad (1.10)$$

$$\text{или} \quad F = \mu (N + P_s S), \quad (1.11)$$

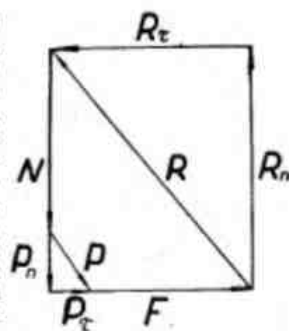


Рис. 3. Векторный многоугольник сил, действующих на контакте (по Б. В. Дерягину)

где  $S$  — площадь фактического контакта;  $p_s$  — среднее удельное давление молекулярного прилипания, действующее на этой площади<sup>1</sup>.

Следует подчеркнуть, что двучленная формула (1.11), образом которой является закон Амонтона—Кулона  $F = \mu N + A$ , учитывающий адгезию поверхностей ( $A$ ), включает в себя любую интерпретацию одночленной формулы Амонтона ( $F = \mu N$ ) как частный случай. Так, например, теория Терцаги—Боудена—Тейбора [40, 41], построенная в предположении, что из-за пренебрежимо малых потерь на упруго-пластическое отнесение материала основной причиной внешнего трения может быть только сцепление поверхностей, приводит к формуле  $F = \tau N / \sigma_s$ , справедливой лишь для случая пластического контакта, когда составляющая  $\mu p_s S$ , зависящая от реакции борновских сил на силы молекулярного притяжения, изменяется пропорционально нагрузке ( $S = N / \sigma_s$ ). Отношение касательного напряжения сдвига к пределу текучести менее твердого материала дает здесь величину коэффициента трения ( $\mu = \tau / \sigma_s$ ).

По мере приближения площади фактического контакта  $S$  к площади номинального контакта  $S_n$  влияние контактной адгезии на силу внешнего трения становится все более ощутимым. Поскольку в теории Дерягина не учитываются силы неконтактной адгезии, то, строго говоря, двучленный закон трения, записанный в форме (1.11), соответствует фрикционному контакту, показанному на рис. 4, а, т. е. при  $S = S_n$ .

С учетом сил неконтактной адгезии, которые действуют между участками поверхностей, относящихся к площади, равной  $S_n - S$  (см. рис. 4, б), будем иметь

$$F = \mu [N + p_s S + p_m (S_n - S)], \quad (1.12)$$

где  $p_m$  — средняя удельная сила притяжения конденсированных фаз.

Как уже упоминалось, существенная роль, которую может играть взаимодействие трущихся тел через излучаемые ими флуктуационные электромагнитные поля, была впервые отмечена Ахматовым. Фрикционному контакту гладких поверхностей, разделенных слоем совершенной граничной смазки (рис. 4, в), соответствует формула трения, предложенная в работе [6]:

$$F = \mu [N + (p_0 + p'_m) S_n], \quad (1.13)$$

где  $p_0$  и  $p'_m$  — средние удельные силы притяжения граничных слоев и конденсированных фаз.

Согласно теории Лифшица, распространенной при участии Дзялошинского и Питаевского на случай взаимодействия твер-

<sup>1</sup> Здесь и далее среднее значение  $p$  любого удельного давления  $p_s$ , действующего на микроплощадках  $\Delta S_{pi}$ , определяется из соотношения  $p S_p = \sum p_i \Delta S_{pi}$ .

дых тел при наличии между ними промежуточной среды, величина  $p'_m$  зависит от диэлектрических свойств смазочной прослойки, и, следовательно,  $p'_m \neq p_m$ . В первом приближении, однако, можно считать, что электромагнитное поле конденсированных фаз проходит «сквозь» граничные слои без существенного поглощения энергии и какого-либо искажения. Тогда, принимая  $p'_m = p_m$  и объединяя формулы (1.12) и (1.13), получим

$$F = \mu [N + p_s S + (p_0 + p_m) (S_n - S)]. \quad (1.14)$$

Это выражение для внешней силы трения соответствует наиболее общей и, естественно, самой распространенной разновидности фрикционного контакта, показанной на рис. 4, г. Все другие выражения для  $F$  непосредственно вытекают из формулы (1.14) как ее частные варианты.

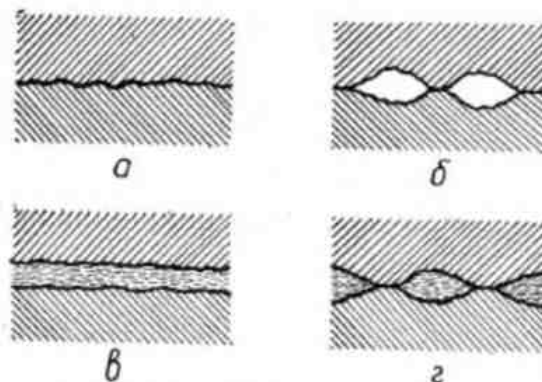


Рис. 4. Разновидности фрикционного контакта: а —  $S = S_n$ ; б —  $S < S_n$  (без смазки); в —  $S = 0$ ; г —  $S < S_n$  (при наличии смазки)

Ввиду того что относительное скольжение, как трансляционный сдвиг атомно-электронных систем, предполагает обязательное существование границы раздела между трущимися телами, фрикционный контакт есть не что иное (по своей физической природе), как своеобразный адгезионный шов. В то же время в условиях, благоприятных для проявления диффузионной компоненты когезии, когда трение приобретает явно выраженный скачкообразный характер (боуденовский «stick-slip»-процесс), упроченные области адгезионного контакта превращаются в участки когезионного шва. Специфика состояния таких участков, например мостиков сварки, образующихся при трении металлов, связана с тем, что начиная с момента их формирования

ния они испытывают комбинированное воздействие нормального и тангенциального напряжений [42].

Если на всей площади фактического контакта трущихся тел преобладает донорно-акцепторный характер связи, то удельное давление  $p_0$  в формуле (1.14) имеет тот же физический смысл, что и электростатическая компонента  $f_e$ .

Величина  $p_0$  отражает вклад, вносимый в суммарную силу аттракции взаимодействием граничных слоев. Последнее, как известно, находится в прямой зависимости от степени проявления молекулярных сил (ориентационных, индукционных, дисперсионных) и водородной связи.

Что касается неконтактной адгезии, характеризуемой при трении величиной  $p_m$ , то, как показано в работе [7], удельная сила притяжения  $p_m$ , относящаяся так же, как и  $p_0$ , к категории ван-дер-ваальсовых сил, практически совпадает по величине с электромагнитной компонентой  $f_m$ . Вряд ли можно сомневаться в общности такого результата, хотя опыты по определению сил аттракционного электромагнитного взаимодействия между металлами проводились в условиях статического (но не кинематического!) граничного трения. Остановимся на этих опытах подробнее.

На специальной установке, представляющей собой трибометр с двумя чувствительными системами — для измерения нормальных и тангенциальных сил, изучалась зависимость  $F = F(N)$  для различных металлов. В качестве смазочной среды был использован чистый препарат стеариновой кислоты; формирование граничного слоя заданной толщины  $H$  производилось методом титрованного раствора Релея—Покелье. Значение  $H$  примерно в 10 раз превышало значение средней арифметической микрогеометрического профиля поверхностей, поэтому скольжение считалось происходящим только внутри смазочного слоя по площади, равной  $S_0$ .

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 5, говорят о том, что в области малых и отрицательных нагрузок зависимость силы статического граничного трения стеариновой кислоты от давления является линейной, причем каждой из исследованных гомогенных пар соответствует прямая  $F = F_0 + kN$  со своим угловым коэффициентом  $k$ , начальной ординатой  $F_0$  и начальной абсциссой  $N_0 = -F_0/k$ . Постепенное увеличение толщины граничного слоя приводило к нейтрализации влияния природы металла на силу трения, и при некотором критическом значении  $H = 1$  мкм ее зависимость от нормальной нагрузки выражалась одной и той же прямой  $F = F_0' + k'N$  для всех исследованных пар (рис. 6). Отсюда был сделан очень важный вывод для развития теории трения: «...силовое поле металлов распространяется над их поверхностью на расстояние не большее 1 мкм и может быть полностью экранировано граничным смазочным слоем».

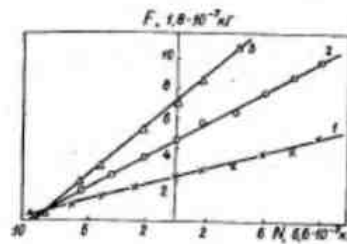


Рис. 5. Влияние природы металлов на зависимость  $F=f(N)$  при малых и отрицательных нагрузках (толщина слоя смазки  $7,5 \cdot 10^{-4}$  м) [7]; 1—Cr—Cr; 2—Cr<sub>3</sub>—Cr<sub>3</sub>; 3—Ni—Ni

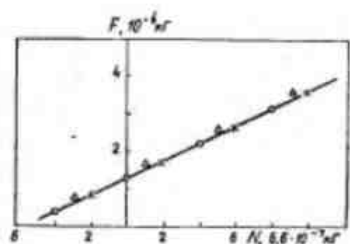


Рис. 6. Зависимость  $F=f(N)$  для различных металлов при большой толщине граничного слоя стеариновой кислоты ( $H = 10^{-4}$  м) [7]

Теоретическая трактовка полученных результатов на основании формул (1.11) и (1.13) позволила авторам легко определить удельную силу молекулярного притяжения конденсированных фаз. Действительно, при  $F=0$ , имея из опыта величину  $N_0$  и используя формулу (1.11), можно найти удельную силу притяжения граничных слоев  $p_0 = N_0'/S_0$  ( $p_m=0$ ); аналогичный прием, но уже с использованием формулы (1.13) дает

$$p_m = \frac{N_0 - N_0'}{S_0} \quad (1.15)$$

Как показали опыты со сталью и стеариновой кислотой, величина  $p_m$  быстро уменьшается при увеличении толщины смазочного слоя, а поведение соответствующих экспериментальных кривых (рис. 7) выражается степенной зависимостью  $p_m = CH^{-4}$ , где  $C = 1,32 \cdot 10^{12}$  кг/см<sup>2</sup>.

То обстоятельство, что значение  $C$  почти совпадает с теоретическим значением константы в формуле Казимира—Лифшица, и говорит как раз в пользу предположения о тождестве  $p_m$  и  $f_m$ .

Итак, мы приходим к заключению, что электроадгезионные силы должны играть весьма видную роль в формировании макроскопической силы трения, коль скоро реакция на них сил отталкивания может оказаться весьма существенной.

Степень проявления электростатической и электромагнитной компонент трения, как это вытекает уже

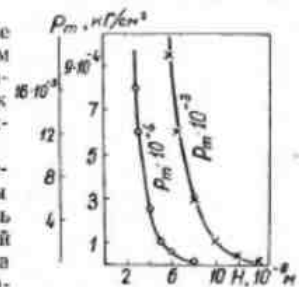


Рис. 7. Зависимость удельной силы молекулярного притяжения конденсированных фаз от расстояния между ними (в двух масштабах по оси ординат) [7]

из априорных соображений, определяется тонким строением металлических поверхностей — речь идет о наличии или отсутствии адсорбированных газовых пленок, тончайших пленок физико-химических соединений, о поверхностной структуре металлов с диффундировавшими в нее атомами химических элементов, входящих в состав среды [43]. В свете кратко охарактеризованных выше представлений здесь следует обратить внимание на значение весьма быстро образующихся окислов, самых разных по структуре и свойствам (гл. II, § 1). Экранируя электромагнитные поля, излучаемые твердыми телами, окисные пленки понижают неконтактную адгезию и в этом смысле выполняют смазочную функцию [32]. Те же самые окислы, однако, могут оказаться полупроводниками с большим числом поверхностных состояний, причем такого типа, что контактная адгезия пленки с металлом (или пленок между собой) будет довольно сильной. Значит, процесс окисления трущихся поверхностей может стать причиной антибатного изменения электростатической и электромагнитной компонент трения.

### § 3. О резонансном электромагнитном механизме диссипации энергии при внешнем трении

К представлениям о характере и взаимодействии приповерхностных полей твердых фаз при трении обращались неоднократно. Их пытались использовать с целью построения электромагнитной теории трения еще Бриллюэн [44], Вуг [45] и др. Эти попытки, однако, оказались безуспешными, хотя Бриллюэну и удалось продемонстрировать рассеяние энергии, обусловленное колебаниями магнитной стрелки, перемещающейся в неоднородном магнитном поле<sup>1</sup>.

Как это видно из вышесказанного, идея о структурности (дискретности, периодичности) молекулярных полей, принадлежащих кристаллическим плоскостям равной ретикулярной плотности, лежит также в основе теории трения Дерягина. Качественно иной характер внешних полей твердых тел как гигантских молекул был учтен Ахматовым при объяснении физической природы электромагнитной слагающей трения<sup>2</sup>. Мы полагаем, однако, что дальнейшее развитие представлений о доминирующей роли силовых полей твердых тел при их фрикционном взаимодействии пойдет по пути совершенствования осцилляторной модели трения, предложенной в работе [8].

<sup>1</sup> Описание электромагнитной модели трения, предложенной самим М. Бриллюэном, можно найти в работе [46].

<sup>2</sup> Изменение характера поля конденсированной фазы по мере удаления от ее поверхности выражается, например, в переходе от системы элементарных сферических волн к волне плоской [32].

Согласно этой модели и уже сделанным на ее основе первым теоретическим обобщениям диссипация энергии при внешнем трении происходит в основном через электромагнитное взаимодействие конденсированных фаз и осуществляется с помощью избирательно-резонансного механизма их эквивалентными осцилляторами. Считается, что указанный механизм относится в равной мере ко всем известным типам взаимодействия (электромагнитному, обменному и др.) и, таким образом, к каждому из слагаемых, которые входят в суммарную энергию взаимодействия трущихся тел в общем случае:

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n \quad (1.16)$$

Учитывая только первую гармонику энергии атомного осциллятора, движущегося в приповерхностном поле подложки, автору, как это подчеркнуто в [8], удалось показать, что классические законы Амонтона—Кулона—Дерягина—Ахматова являются линейными приближениями «истинного закона трения, определяемого в действительности фактическим ходом приповерхностного поля твердой фазы в непосредственной близости от поверхности».

Отмечая исключительную плодотворность такого энергетического подхода к построению вполне строгой физической теории трения, который в известном смысле является логическим продолжением работы [47], нельзя, однако, не указать на одно весьма важное обстоятельство. Дело в том, что в теории Буфеева под резонансно-избирательным механизмом понимается требование определенной близости собственных частот у взаимодействующих осцилляторов трущихся тел. Стало быть, независимо от того, какие физически эквивалентные осцилляторы ответственны за трение, будь то эйнштейновские осцилляторы, борн-кармановские колебания решетки, колебания атомных групп и т. д., они резонировали еще до того, как началось относительное скольжение. Последнее лишь предопределяет вероятность встречи различных эквивалентных осцилляторов и их дополнительной резонансной раскачки. Используя простейшую эйнштейновскую модель твердого тела, Буфеев рассчитал резонансную составляющую силы трения, показав в то же время, что в условиях, когда частота периодических возмущений основных осцилляторов, зависящая от скорости скольжения, много меньше их собственной частоты, прочие потери малы. Эти прочие электромагнитные потери трактуются как нерезонансные, хотя в данном случае в само явление резонанса, если бы, конечно, оно стало реальностью, должен быть вложен иной смысл. В отличие от естественного «статического» резонанса, связанного только с периодичкой во времени, речь теперь идет о близости частот, одна из которых по-прежнему отражает лишь собственную периодичку во времени, а другая — вынужденную периодичку во времени, зависящую от характера упорядоченного расположения осцилля-

торов (периодика в пространстве). Такой «динамический» резонанс является прямым следствием относительного движения тел. О его возможности говорит как раз существование сложного спектра когерентных колебаний атомов и целых структурных групп, в котором наряду с эйнштейновской характеристической частотой содержится множество других составляющих вплоть до частот акустических колебаний самого тела. Что касается оценки нерезонансной (по Буфееву) составляющей силы трения, то ее удельная величина, приходящаяся на единицу площади соприкосновения, определялась из соотношения  $f_{\text{тр}} = s_n/v$ , где  $s_n$  — нормальная составляющая вектора Пойнтинга,  $v$  — скорость относительного скольжения<sup>1</sup>. Максимальные числовые оценки этой величины находились на основе модельных представлений Смолуховского—Херринга—Гийо о двойном поверхностном электрическом слое (гомогенные пары), с привлечением модели мгновенно заряжающегося конденсатора (гетерогенные пары) и т. д. Они оказались сравнительно малыми, что позволяет обобщить заключение о малости потерь энергии на излучение [32], т. е. считать его справедливым не только для упругих, но и для электромагнитных волн. Надо, однако, заметить, что рассеяние энергии волн при их проникновении внутрь трущихся тел, происходящее вследствие «чистого» излучения, и не могло быть основным диссипативным процессом. С физической точки зрения такой процесс должен ассоциироваться с другими явлениями релаксационного типа, но прежде всего — с динамическим резонансом, а также с упругим и электромагнитным гистерезисом материалов, зависящим от их реальных кристаллических структур, определяемых дефектами решеток.

С учетом всего изложенного и была предпринята попытка использовать микроскопическую электродинамику Максвелла—Лоренца как основу новой теории трения, при построении которой автор руководствовался следующими моментами:

а) в теории трения должны быть наглядно выражены как периодика процессов во времени, так и периодика состояний в пространстве;

б) механизм диссипации энергии при трении связан в основном с переходом кинетической энергии трущихся тел в энергию колебательного движения осцилляторов при их периодических столкновениях, то есть в конечном счете в тепло.

#### § 4. Элементарная теория трения

В первом приближении рассмотрим случай взаимной трансляции двух наложенных друг на друга монокристаллов, как это дела-

<sup>1</sup> В случае генерации упругих волн, который был рассмотрен Э. И. Адироничем и Д. И. Блохинцевым,  $f_{\text{тр}} = f_n/v$ ,  $f_n$  — нормальная компонента вектора Умова.

ется, например, в теории трения Дерягина<sup>1</sup>. Приписав таким кристаллам металлическое состояние и используя модель металла в виде ионной решетки, погруженной в электронный газ, будем считать, что роль эквивалентных осцилляторов играют положительно заряженные атомные остатки, совершающие гармонические колебания с собственной циклической частотой  $\omega$ . Каждый такой осциллятор, принадлежащий одной из поверхностей скольжения, оказывается в избегающем на него электрическом поле, распределенном по смежной кристаллической плоскости с периодом, равным постоянной решетки. Нетрудно видеть, что именно факт относительного движения тел позволяет перейти от периодики в пространстве к периодике во времени и полагать каждый из поверхностных ионов находящимся во внешнем электрическом поле, периодически изменяющемся во времени. Это поле удобно считать простой синусоидальной функцией частоты

$$\omega = 2\pi \frac{v}{a}, \quad (1.17)$$

где  $v$  — скорость относительного скольжения;

$a$  — постоянная решетки<sup>2</sup>.

Поле иного вида, имеющее место в действительности, всегда можно представить в виде совокупности таких функций (по теореме Фурье), поэтому решение общей задачи свелось бы к тем же приемам.

Воспользовавшись принципом суперпозиции, легко прийти к заключению, что преимущественным направлением колебаний ионов под действием электрического поля является направление нормали к границе раздела фаз (ось  $z$ ). Это же следует, кстати, и из характера взаимодействия нейтральных атомов, если учесть, что в зависимости от расстояния между ними борновские электростатические силы отталкивания изменяются гораздо быстрее, чем силы притяжения.

Теперь, поступая аналогично тому, как это делается в классической теории дисперсии света, мы можем написать для любого из поверхностных ионов ньютоново уравнение движения

$$m\ddot{z} = -kz - r\dot{z} + qE_0 \cos \omega t, \quad (1.18)$$

где  $m$  и  $q$  — масса и заряд иона;

$k$  — константа квазиупругой связи;

$r$  — коэффициент сопротивления;

$E_0$  — амплитуда напряженности поля  $E$ .

<sup>1</sup> Монокристаллы умышленно не называются идеальными, чтобы подчеркнуть наличие у них двумерных дефектов, каковыми являются внешние поверхности.

<sup>2</sup> В общем случае под  $a$  понимается период идентичности расположения осцилляторов.

Придадим ему общепринятый вид дифференциального уравнения вынужденных колебаний

$$\ddot{z} + 2\beta\dot{z} + \omega_0^2 z = \frac{q}{m} E_0 \cos \omega t, \quad (1.19)$$

где  $\beta = \frac{r}{2m}$  — коэффициент затухания;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Расстояние между трущимися атомными плоскостями с учетом их сближения под действием нормальной нагрузки  $N$  можно приближенно выразить зависимостью

$$h = z_0 - bN + z(t), \quad (1.20)$$

которая упрощается до

$$h = z_0 - bN,$$

так как  $z(t) \ll a$ . Здесь  $b$  — постоянная.

Тогда

$$E_0 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 (z_0 - bN)^2}, \quad (1.21)$$

и, согласно (1.19), амплитуда вынужденных колебаний иона

$$A = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 m (z_0 - bN)^2 \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}. \quad (1.22)$$

Убыль энергии иона в течение периода ( $T = a/v$ ), восполняемая за счет работы вынуждающей силы ( $f = qE$ ), равна

$$\Delta W = \int_0^T f(t) \dot{z} dt = \pi A q E_0 \sin \varphi, \quad (1.23)$$

где  $\varphi$  — отставание по фазе вынужденного колебания от обусловившей его внешней силы<sup>1</sup>. Поскольку

$$\sin \varphi = \frac{2\beta\omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \quad (1.24)$$

то, подставляя выражения (1.21), (1.22) и (1.24) в формулу (1.23), получим

$$\Delta W = \frac{2\pi\beta_0 q^4}{m (4\pi\epsilon_0)^2 (z_0 - bN)^4 [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2]}. \quad (1.25)$$

<sup>1</sup> В случае  $\omega \neq \omega_0$  энергия  $\Delta W$ , рассеянная за период, в точности соответствует площади петли динамического гистерезиса в системе координат  $\Sigma - z$ , где  $\Sigma$  — сумма сил упругого  $kz$  и внешнего  $F_2$  сопротивлений ( $k = \pi\epsilon_0 A^2$ ) [48].

Так как именно в пограничных монокристаллических слоях диссипация энергии при трении происходит наиболее интенсивно, суммарную долю энергетических потерь, которая приходится за период на обе симметричные системы осцилляторов (по отношению к границе раздела), можно представить в виде

$$\Sigma \Delta W = 2\Delta W n S, \quad (1.26)$$

где  $n$  — число ионов на единичной площадке каждой из сопряженных поверхностей;

$S$  — фактическая площадь контакта.

Если  $F$  — сила трения, то по физическому смыслу

$$F = \frac{\Sigma \Delta W}{vT} = \frac{\Sigma \Delta W}{a}$$

или, учитывая (1.25) и (1.26),

$$F = \frac{\beta_0 q^4 n S}{4\pi\epsilon_0^2 m a (z_0 - bN)^4 [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2]}. \quad (1.27)$$

Наименее определенной величиной, входящей в выражение (1.27), является коэффициент затухания. Его расчет в предположении, что основные потери энергии колебаний связаны с излучением электромагнитных волн, можно произвести по формуле [49]:

$$\beta = \frac{q^2 \omega_0^2}{12\pi\epsilon_0 m c^3}, \quad (1.28)$$

где  $c$  — электродинамическая постоянная. Как и следовало ожидать, величина  $\beta$ , найденная таким образом (например, для ионов меди), приводит к неправдоподобно низким значениям силы трения.

Обращаясь к другим процессам рассеяния колебательной энергии, необходимо подчеркнуть следующее очень важное обстоятельство: все эти процессы, включая затухание вследствие излучения, в одинаковой мере характерны как для атомов, образующих трущиеся поверхности, так и для атомов внутренних слоев. Иными словами, физическая сущность явлений, из которых складываются механизмы превращения энергии колебаний в тепловую энергию, одна и та же, независимо от того, о каком трении идет речь — внешнем или внутреннем. Это обстоятельство, кстати, позволило автору заметить, что аналогия формул Дерягина и Крагельского, выражающих двучленный закон трения, не случайна, — она говорит о том, что и при механических зацеплениях шероховатостей диссипация энергии происходит в результате трансляционного сдвига периодических молекулярных полей [25].

Близость моделей внешнего трения монокристаллов и внутреннего трения релаксационно-резонансного типа, обнаружива-

ющего частотную зависимость, позволяет оценивать добротность  $Q$  внешних осцилляторов по экспериментальным данным, имеющимся в работе [48]. Поэтому формуле (1.27) целесообразно придать такой вид, чтобы она содержала  $Q$ , а не  $\beta^1$ . Для этого, считая величину фазового сдвига  $\varphi$  достаточно малой, энергию колебаний атомного остатка запишем в виде

$$W = \frac{1}{2} AqE_0 \quad (1.29)$$

Тогда из формул (1.23) и (1.29) следует, что

$$\sin \varphi = \frac{1}{2\epsilon} \cdot \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{Q}, \quad (1.30)$$

и, с учетом выражения (1.24), получим

$$F = \frac{q^2 n S}{8\pi_0^2 m a Q (\alpha_0 - bN)^4 \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \quad (1.31)$$

Поверхностная концентрация ионов

$$n = \frac{\delta}{a^2},$$

где  $\delta$  — множитель, зависящий от типа сопряженных решеток. Для ОЦК-структур, например,  $\delta=1$ ; для ЦЦК-структур  $\delta=2$ . Подставляя выражение  $n$  в формулу (1.31), имеем

$$F = \frac{\delta q^2 S}{8\pi_0^2 m a^2 Q (\alpha_0 - bN)^4 \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \quad (1.32)$$

Атомы элементов, находящихся в середине периодической таблицы (медь, железо, германий и т. д.), колеблются с собственной частотой  $\omega_0 \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$  ( $\nu_0 \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$ ), что соответствует температуре Эйнштейна  $\Theta_E \sim 300 \text{ К}$ . Стало быть, в диапазоне скоростей относительного скольжения, наиболее часто встречающихся на практике,  $\omega \ll \omega_0$  (модель трения релаксационного типа) и

$$F = \frac{\delta q^2 S}{8\pi_0^2 m a^2 Q (\alpha_0 - bN)^4} \quad (1.33)$$

Попытаемся оценить силу трения ювенильных поверхностей, образованных ионами двухвалентной меди, при скольжении со скоростью 1 м/с. Согласно [50], граничная частота Дебая для меди  $\nu_0 = 6,5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$  (характеристическая температура Дебая для меди  $\Theta_D = 310 \text{ К}$ ). Значит,  $\omega_0 \approx 4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . Так как  $a = 3,61 \text{ \AA}$ ,  $\nu \approx 2,8 \cdot 10^9 \text{ Гц}$  ( $\omega \approx 1,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ). Для этой частоты

<sup>1</sup> Известно в виду  $\beta$  только в числителе формулы (1.27).

ты будем считать  $Q \sim 10^4 \div 10^5$  (см. [48], с. 44, рис. 25). Полагая  $(\alpha_0 - bN) \approx 3,4 \text{ \AA}$ ,  $S \sim 10^{-6} \text{ м}^2$  и учитывая, что  $\delta=2$ ,  $q=3,2 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ ,  $m \approx 10^{-25} \text{ кг}$ , получим  $F \sim (1 \div 10) \text{ Н}$ . Это разумный порядок величины для искомой силы трения; его правдоподобность подтвердили простейшие опыты.

Следствием найденных выражений являются также важные функциональные связи, как, например, между  $F$  и  $Q$  или, что легко теперь показать, между  $\Delta T$  и  $Q$ , где под  $\Delta T$  понимается приращение температуры, обусловленное трением.

Представим теперь внешнюю силу в виде тригонометрического ряда

$$f(t) = \sum q E_{0k} \cos(\omega_k t - \alpha_k). \quad (1.34)$$

Тогда, принимая во внимание, что на трущиеся поверхности может выходить несколько сортов осцилляторов<sup>1</sup> с параметрами  $q_i$ ,  $m_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $\beta_i$ ,  $Q_i$ , заменим формулу (1.31) выражением

$$F = \frac{S}{8\pi_0^2} \sum_i \sum_k \frac{q_i^2}{m_i a_i Q_i (\alpha_i - bN)^4 \sqrt{(\omega_{0i}^2 - \omega_k^2)^2 + 4\beta_i^2 \omega_k^2}}, \quad (1.35)$$

где символика  $i(k)$  указывает на функциональную связь между  $Q_i$  и  $\omega_k$ .

Полученное выражение помогает дать ясный ответ на вопрос о физической природе зависимости сил трения от скорости. Из него следует, что, подобно механическому спектру твердого тела  $Q^{-1}(\nu)$ , кривая  $F(v)$  содержит ряд чередующихся максимумов и минимумов. Такой же характер, кстати, имеет и кривая дисперсии света при наличии нескольких полос поглощения. Сила трения достигает максимальных, а добротность — минимальных значений при таких скоростях скольжения, когда

$$\omega_k = \sqrt{\omega_{0i}^2 - 2\beta_i^2}, \quad (1.36)$$

то есть при динамическом резонансе одной из основных групп эквивалентных осцилляторов. В этом и состоит, по нашему мнению, резонансно-избирательный механизм диссипации энергии, приводящий к появлению фрикционного спектра поглощения  $F(v)$ . Отсюда также можно заключить, что формальные модели, построенные в предположении независимости сил трения от скорости и фактически не отражающие периодичности парных взаимодействий частиц, образующих конденсированные системы, приемлемы лишь для установившихся режимов скольжения.

<sup>1</sup> В том числе линейные цепочки ионов, ориентированные вдоль оси  $x$ , для которых, а значит, в какой-то мере и сила трения (вспомни аналогично с колеблющейся струной) определяются размерами тел («масштабный фактор»).



Наглядным примером проявления динамического резонанса при частотах, близких к характеристической частоте атомных осцилляторов, являются опыты, в которых скорость скольжения доходила до 1000 м/с ( $\omega \sim 2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ) [51]. Происходящее при этом поглощение энергии оказывается настолько интенсивным, что вследствие конечной теплопроводности металла на его поверхности возникает очень тонкий оплавленный слой, выполняющий смазочную функцию (подобно слою воды при движении конька по льду). Заметим, кстати, что при указанной частоте внешнего воздействия существует и максимум внутреннего трения релаксационного типа ( $\omega\tau = 1$ , где  $\tau$  — время температурной релаксации) [48]. Возбужденная область, в которой происходит релаксация теплового потока, сжимается к границе раздела, что также способствует переходу фрикционной пары из атермического режима скольжения в режим термической (квазиadiaбатный).

Механизм внешнего трения реальных материалов имеет много общего с механизмом внутреннего трения гистерезисного типа. Наличие в трущихся телах большого количества разнообразных дефектов приводит, разумеется, к необратимым изменениям их состояния. Однако и в случае нелинейности вязких и восстанавливающих сил оценка силы  $F$  становится возможной, если известны площади петель динамического гистерезиса в координатах  $\Sigma - z$ , представляющие собой суперпозицию релаксационных и гистерезисных потерь.

Резонанс, гистерезис и релаксация, сосуществуя в процессах внешнего трения, вносят различный вклад в величину поглощения энергии. Сравнительная оценка относительного рассеяния энергии  $\Delta W/W$  для металлов показывает, что оно составляет сотые или даже тысячные доли процента ( $Q \sim 10^4 - 10^6$ ) в случае релаксационных потерь, десятые доли процента при явлениях статического гистерезиса и несколько процентов ( $Q \sim 10^2$ ) при явлениях динамического резонанса. Что касается сплавов, то при их применении в узлах трения доля энергетических потерь, обусловленных статическим гистерезисом, может быть наиболее ощутимой.

В свете изложенного нельзя не подчеркнуть то особое значение, которое приобретает изучение свойств осцилляторов, являющихся дефектами структуры или непосредственно с ними связанных (дислокационные осцилляторы, ленгмюровские пятна на поверхности металлического поликристалла и т. д.).

Надо, однако, заметить, что изменение энергии дислокационных осцилляторов не поддается описанию в рамках классической электродинамики: потеря энергии возбужденными дислокациями рассматривается как совокупность независимых квантовых переходов, происходящих в разные моменты времени [52]. Поэтому дальнейшее развитие теории предполагает возможность обобщений на основе квантовой механики.

## § 5. Электронный механизм пластифицирования твердых тел при их контактом взаимодействии

Ввиду фундаментальной роли энергетического состояния трущихся поверхностей несомненный интерес представляет работа [10], в которой изменение поверхностной энергии на границе раздела между металлами как результат их непосредственного соприкосновения получило качественное квазиклассическое толкование.

Известно, что в приближении свободных электронов трехмерный металлический образец, имеющий форму куба с длиной ребра  $L$ , представляет собой прямоугольный потенциальный ящик. Грани кристалла, совпадающие с границами этого ящика, являются для электронов проводимости потенциальным барьером, встречаясь с которым они сообщают поверхности некоторый импульс. Что касается вопроса об изменении энергетического состояния границы раздела (металл — вакуум), то его решение фактически сводится к рассмотрению характера рассеяния на поверхности электронов проводимости.

Заметив, что при абсолютном нуле такой процесс не вызывает изменений в распределении Ферми—Дирака, авторы обращают внимание на то обстоятельство, что средний интервал времени  $\tau$  между столкновениями с противоположными границами кристалла тех электронов, которые находятся в состояниях с компонентами волновых векторов  $(k_x, k_y, k_z)$  и  $(-k_x, k_y, k_z)$ , является конечным по величине, хотя и очень малым:

$$\tau \sim \frac{mL}{p_x}, \quad (1.37)$$

где  $m$  — масса электрона;  $p_x$  — проекция импульса электрона на ось  $x$ . Отсюда следует вывод о целесообразности заменить условие упругого отражения электронов другим условием, полученным для неупругого отражения частицы, как более вероятного. С этой целью рассмотрим механизм неупругого рассеяния, основываясь на приведенных выше соображениях, как это делается в работе [10].

Поверхность кристалла, получив от столкнувшегося с ней электрона некоторую энергию  $W'$ , переходит в метастабильное состояние на некоторое время  $\tau'$ , после чего возвращает избыточную энергию электронам. Из соотношения неопределенностей Гайзенберга имеем

$$\tau' \sim \frac{\hbar}{\Delta W'}. \quad (1.38)$$

Мы пока не знаем, где находится область наиболее вероятной локализации электрона, когда фронт его волновой функции дойдет до поверхности кристалла. Сама же локализация электрона

в граничном слое, по-видимому, возможна, если учесть, что в момент его встречи с потенциальным барьером все энергетические уровни вплоть до уровня Ферми заполнены. Стало быть, процесс неупругого рассеяния электронов является как бы продуктом их промежуточной локализации, выражающейся в переходе на время  $\tau'$  из состояния  $(k_x, k_y, k_z)$  в состояние с нулевым квантовым числом  $(0, k_y, k_z)$ <sup>1</sup>. Как того требует условие динамического равновесия,

$$\tau' \sim \tau, \quad (1.39)$$

т. е. общее число локализованных электронов или, что равнозначно, электронов, находящихся в состояниях с нулевыми квантовыми числами, должно оставаться неизменным.

Поскольку локализация электронов при неупругих соударениях сопровождается рождением фононов, граничные условия для волновых функций  $\psi$  уже не соответствуют общепринятым условиям Кармана—Борна, которые в применении к телам конечных размеров записываются следующим образом:

$$\psi(0, y, z) = \psi(L, y, z) = 0. \quad (1.40)$$

Именно разрешением нулевых квантовых чисел отличается изложенный здесь подход от работ [54] и [55].

Полная энергия электронного газа может быть представлена в виде

$$W = W_v + W_s, \quad (1.41)$$

где  $W_v$  — энергия электронов, находящихся внутри объема образца ( $L^3$ );  $W_s$  — энергия электронов, локализованных вблизи от поверхности.

Ссылаясь на результаты указанных работ [54, 55], авторы не останавливаются на определении величин  $W_v$  и  $W_s$ , отмечая в то же время, что энергия, получаемая решеткой от локализованных электронов,  $W_l \sim W_s$ , причем электронный вклад в поверхностную энергию пропорционален величине потенциального барьера, на котором происходит рассеяние.

Если оставаться на почве макромолекулярных аналогий (считать кристалл гигантской молекулой) и следовать [56], то для одномерных потенциальных ям, ограничивающих трехмерный ящик, энергию Ферми можно выразить формулой

$$W_F \approx \frac{26,07}{V^{1/3}}, \quad (1.42)$$

где  $V$  — мольный объем металла<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Эквивалентность компонент волнового вектора квантовым числам  $n_x, n_y, n_z$  (энергия электрона зависит от  $n^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$ ) очевидна из соотношения  $k = \frac{2\pi}{L} \cdot n$  [53].

<sup>2</sup> Справедливость этой формулы, записанной в несколько ином виде, была косвенно подтверждена с точностью  $\sim 5\%$  на 26 металлах и полупроводниках [57].

Зная химические потенциалы приведенных в соприкосновение металлов ( $W_{F1}$  и  $W_{F2}$  на рис. 8), нетрудно составить представление о поверхностной энергии на границе раздела. Из рис. 8 следует, что на потенциальном барьере величиной  $U$  рассеиваются только те электроны проводимости,

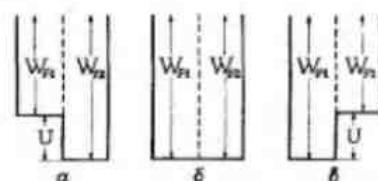


Рис. 8. Типичные случаи соотношения между химическими потенциалами контактирующих металлов [10]

поставщиком которых является металл с большим химическим потенциалом. Значит, именно в этом металле аккумулируется поверхностная энергия, в то время как со стороны другого металла она резко снижается. Если химические потенциалы контактирующих металлов одинаковы (рис. 8, б), то поверхностная энергия границы раздела равна нулю, то есть сама эта граница фактически исчезает. Отсутствие асимметрии в электронной плотности при непосредственном контакте тел является как раз необходимым условием образования когезионных связей (см. § 1).

Все дальнейшие результаты, рассматриваемые авторами, справедливы только в том случае, если они удовлетворяют условию симбатного изменения химического потенциала и работы выхода электрона ( $\phi$ ) при переходе от металла к металлу. Отсутствие обоснования такой симбатности, отнюдь не вытекающей из априорных соображений, является, к сожалению, серьезным недостатком работы [10]. Несмотря на это, стоит обратиться к тем следствиям из охарактеризованных выше представлений, которые получены в предположении, что поставленное условие выполняется.

Среди них, в частности, особый интерес представляет возможность оценки энергии дефекта упаковки (э. д. у.), о чем, наряду с [10], уже упоминалось в предыдущих работах авторов [58, 59]. Действительно, нарушение правильной укладки плоскостей скольжения приводит к появлению границы раздела между различными кристаллографическими модификациями внутри одного и того же металла. Если бы работа выхода каждой из этих модификаций была нам известна, вопрос был бы исчерпан. В связи с тем, однако, что указанная работа выхода не поддается прямому экспериментальному определению, авторы попытались установить зависимость между э. д. у. и работой выхода металла исходной кристаллографической структуры. Сводный график такой зависимости, имеющей корреляционный характер, приведен на рис. 9. Учитывая, что коэффициент корреляции для ГЦК- и ОЦК-структур оказался равным примерно 0,8, авторы высказали предположение, согласно которому вклад в э. д. у., вносимый «испаряющимися» с поверхности Ферми

электронами, может быть весьма существенным. Таким образом, к факторам, влияющие на изменение энергии дефекта упаковки связывалось с электронным строением (электронная концентрация, разница в атомных радиусах, изменение плотности состояний, изменение топологии поверхности Ферми [60], прибавился еще один — избыточное давление электронного газа. Физическая природа такого давления, вероятно, одна и та же, независимо от того, действует ли оно на поверхность дефекта упаковки или проявляется себя в изменении энергетического состояния границы раздела между металлами, которая фактически представляет собой двусторонний дефект структуры.

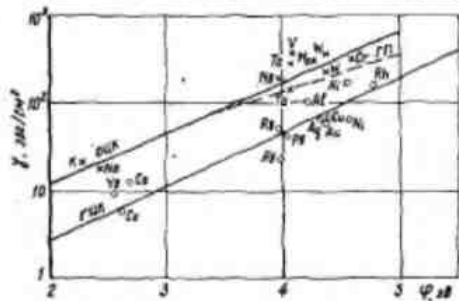


Рис. 9. Корреляционная зависимость между работой выхода и энергией дефекта упаковки [10].

X — металлы с ОЦК-решеткой; O — металлы с ГЦК-решеткой (металлы с ГЦК-решеткой не указаны)

В согласии с развитыми теоретическими предположениями Сидоров и соотр. пришли к заключению, что в том из контактирующих металлов, у которого меньше работа выхода, пластифицирование поверхностного слоя осуществляется наиболее свободно. Такая точка зрения дополняет выводы работы [61], в которой повышение подвижности дислокаций и вызванное им ускорение пластической деформации в поверхностном слое рассматривается как результат снижения поверхностной энергии. Она, эта точка зрения, находится в полном соответствии с представлениями о понижении прочности твердых тел под влиянием адсорбции поверхностно-активных веществ (эффект Ребиндера).

Предположение об электронном механизме пластифицирования твердых тел позволило по-новому осветить процессы, протекающие при фреттинг-коррозии [10].

Из сказанного ясно, что для увеличения долговечности образца материал накладки предпочтительнее выбирать таким образом, чтобы  $\phi_n < \phi_{об}$ . Тогда с началом пластифицирования тонкого поверхностного слоя накладки он будет выполнять сма-

зочную функцию (до определенной стадии упрочнения), которая по своему механизму очень похожа на действие так называемой «электронной смазки», уменьшающей износ при трении [62].

Подтверждением этих выводов служат данные о влиянии фреттинг-коррозии на долговечность при циклическом нагружении образцов из стали X18H10T и меди с работами выхода 3,6 и 4,4 эВ соответственно (рис. 10). Опыты проводились по методике, описанной в работе [63]; в качестве накладок использовались те же материалы.

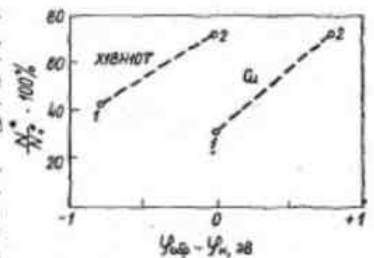


Рис. 10. Относительное изменение долговечности образцов при циклическом нагружении под действием контактного трения накладок [10]. Материал контактирующей накладки:

1 — медь ( $\phi = 4,4$  эВ); 2 — сталь X18H10T ( $\phi = 3,6$  эВ). Долговечность образцов без контактного трения ( $N_0$ ) принята за 100%

Авторы сравнивают полученные результаты с результатами исследования Алябьева и соотр. [64], согласно которым материал образца защищен от фреттинг-коррозии, если он контактирует с материалом, имеющим (по отношению к нему) более отрицательный электродный потенциал. Такое сравнение говорит в пользу соображений, развитых в работе [10], и подтверждает существование функциональной взаимосвязи между работой выхода материала и его стандартным электрохимическим потенциалом.

В заключение отметим, что электронная теория пластификации, несмотря на свой пока еще чисто эскизный характер, может стать хорошей основой для разработки практических рекомендаций (см. также гл. V, § 2).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ТРЕНИИ МЕТАЛЛОВ

### § 1. Работа выхода электрона как критерий физико-химической активности трущихся поверхностей

Прочность адгезионно-когезионного шва определяется энергетическим состоянием поверхностей, образующих фрикционный контакт. Поскольку механическое воздействие на поверхности слоев металлов является при трении неизбежным, то энергетическое состояние участков контактной зоны будет непрерывно изменяться. Поверхности, свободная энергия которых в результате взаимодействия увеличилась, будут стремиться возвратиться в состояние термодинамического равновесия с окружающей средой, то есть в состояние наибольшей пассивности. От того, насколько быстро удастся снять фрикционную механическую активацию и каков характер протекающих при этом физико-химических процессов, зависит как сами параметры трения, так и соотношения между ними.

Наиболее емкой физической характеристикой, отражающей энергетическое состояние поверхности твердого тела, является работа выхода электрона. О целесообразности ее привлечения для анализа процессов трения и изнашивания говорят, в частности, изложенные выше представления об электронном механизме пластифицирования поверхностных слоев, прилегающих непосредственно к границе раздела между металлами, возможность контроля за состоянием трущихся поверхностей в режиме набирательного переноса [65, 66] и т. д. Величина работы выхода ( $\varphi$ ) фигурирует в целом ряде полуэмпирических формул, предложенных для определения поверхностной энергии ( $\sigma$ ). Так, например, согласно [67],

$$\sigma = \varphi Z / 1,885 R^2 \cdot 10^{-3} \text{ (эрг/см}^2\text{)}, \quad (2.1)$$

где  $Z$  — количество свободных электронов на атом;  $R$  — атомный радиус, Å.

От разности работ выхода приводимых в соприкосновение металлов зависит напряженность контактных электрических полей, обеспечивающих значительную адгезию, и, стало быть, электростатическая компонента трения.

Работа выхода электрона определяется на основании измерений контактной разности потенциалов (КРП или  $V_c$ ) по отношению к металлу-эталоны (обычно золоту):

$$\varphi_{Me} - \varphi_{Au} = eV_c \quad (2.2)$$

( $e$  — заряд электрона). Часто вообще ограничиваются лишь сопоставлением значений  $V_c$ , отвечающих показаниям прибора.

Для измерения КРП в вакууме и в атмосферных условиях принято пользоваться методом вибрирующего электрода (динамического конденсатора). Описание одного из вариантов установки такого рода приведено в работе [68]. Установка, при изготовлении которой была использована принципиальная схема, разработанная Марковым [69], состоит из следующих основных элементов (рис. 11): емкостного датчика ( $D$ ), генератора раскочки камертона ( $G$ ), усилителя ( $У$ ), компенсирующего устройства ( $K$ ) и индикатора нуля ( $I$ ). Колебания камертона, поддерживаемые малоомощным электромагнитом, передаются жестко связанному с одной из его ветвей эталонному образцу. При этом постоянный сигнал, пропорциональный разности работ выхода  $\varphi_{Au} - \varphi_{Me}$ , преобразуется в переменный, который подается на индикатор нуля (например, осциллограф) после двухступенчатого усиления, сначала с помощью электрометрической лампы, а затем — транзисторного усилителя. Для измерения величины сигнала применяется компенсационный метод.

Юстировка установки практически сводится к замене исследуемой пластины вторым золотым электродом. При появлении ложного сигнала на индикаторе производится коррекция нуля.

Чувствительность такой установки, измерительная камера которой защищена от влияния внешних электромагнитных полей стальным разъемным корпусом, составляет 4—5 мВ. Она зависит от глубины модуляции сигнала, под которой понимается отношение амплитуды колебания эталонной пластины конденсатора к расстоянию между пластинками в том случае, когда камертон покоится. Чтобы исключить возможность соприкосновения образцов, приводящего к загрязнению поверхности эталона, и в то же время добиться нужного (по величине) сигнала, подаваемого на усилитель, в работе [68] рекомендуются значения глубины модуляции в пределах от 0,55 до 0,80. Отметим, кстати, что на чувствительности установки может заметно отразиться нестабильность частоты генератора раскочки, работающего в режиме остро-

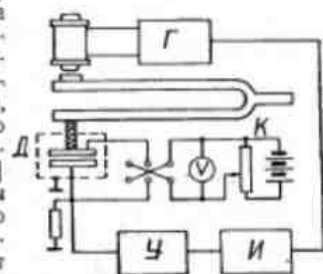


Рис. 11. Схема установки для измерения контактной разности потенциалов [68]

го резонанса. Даже небольшое отклонение частоты генератора от частоты колебаний камертона, имеющего большую добротность, влечет за собой резкое ослабление сигнала из-за уменьшения глубины модуляции.

Марковым [69] измерялась КРП металлов по отношению к золоту при механическом воздействии на поверхность зачисткой наждачной шкуркой и при трении одноименных металлов без смазки. Показано (табл. 1), что удаление окисных пленок

Таблица 1

Величина КРП металлов, подвергнутых механическому воздействию, мВ [69]

Металл	Исходное (окисленное) состояние	Зачистка наждачной шкуркой		Трение без смазки	
		через 0,1 мин	через 1 мин	через 0,1 мин	через 1 мин
Медь М2	50	250	250	230	225
Сплав АК4	1000	1300	1280	1250	1220
Латунь Л62	200	580	560	540	520
Азотирующая сталь 38ХМЮА	170	340	335	—	—

и разрушение тонких поверхностных слоев металла сопровождается резким уменьшением работы выхода электрона по абсолютной величине (см. формулу 2.2), причем восстановление первоначального состояния поверхности, подвергнутой механической активации, наблюдалось лишь после выдержки металла в атмосферных условиях в течение 10—15 суток. В условиях граничной смазки, когда на дорожке трения происходило пластическое деформирование металла, его поверхность, насыщенная различного рода дефектами (дислокациями, вакансиями, экструзиями, интрузиями и пр.), становилась настолько активной по отношению к окружающей среде, что с течением времени работа выхода электрона была больше на дорожке трения, чем вне ее (рис. 12).

Посредством измерения работы выхода электрона Марковым и сотр. [69, 70] исследовалось влияние на энергетическое состояние поверхности жидких смазочных сред. О том, как протекает взаимодействие металлов с различными по составу и свойствам смазками, предлагается судить по адсорбционным кривым, методика построения которых состоит в следующем. До нанесения смазки ад-

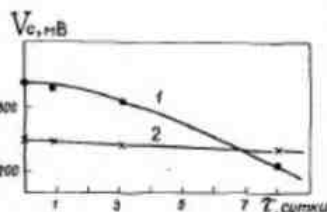


Рис. 12. Изменение работы выхода электрона стали 30ХГСА при выдержке ее в комнатных условиях [69]: 1—дорожка трения; 2—вне дорожки трения

сорбата на поверхность исследуемых образцов последние, будучи тщательно очищенными от загрязнений путем промывки в петролейном эфире, обработки абразивной шкуркой и активированным углем с последующей повторной промывкой петролейным эфиром<sup>1</sup>, используются для измерения исходного значения  $V_{\text{св}}$  и соответствующей величины работы выхода электрона. Затем на поверхность пластин наносится адсорбат путем погружения их в смазочную среду и выдержки в ней при комнатной температуре в течение выбранных промежутков времени. После удаления с поверхности образцов излишков смазки (производится безазольным бумажным фильтром) измеряется  $V_{\text{св(ад)}}$ — контактная разность потенциалов при наличии адсорбционного слоя, видоизменяющего и ослабляющего поле конденсированных фаз. Кривая зависимости  $\Delta V_{\text{св}} = V_{\text{св(ад)}} - V_{\text{св}}$  от времени выдержки  $t$  и дает некоторое представление о кинетике адсорбции молекул смазки и возможной перестройки адсорбционного слоя на поверхности металла. Влияние такой перестройки на КРП мы постоянно имеем в виду при использовании несколько неточной терминологии, принятой в работах [69, 70].

По изотермам адсорбции, показанным на рис. 13, например, можно сравнить адсорбционную способность двух равновесных масляных основ (загущенного масла и полученного смешением минеральных масел компаунда) с различными противозносами присадками одинаковой концентрации. Принимая во внимание, что в зависимости от физико-химического средства смазочных жидкостей к поверхности твердого тела наблюдается как увеличение, так и уменьшение КРП, адсорбцию оценивают по абсолютному значению  $\Delta V_{\text{св}}$ , а также по скорости изменения этого параметра. Из рис. 13 следует, что адсорбция присадок из раствора масла происходит с разными скоростями и имеет существенно различную величину. Очевидно, что определяющими факторами при этом являются преобладающий тип и степень проявления связи между адсорбатом и адсорбентом. Как

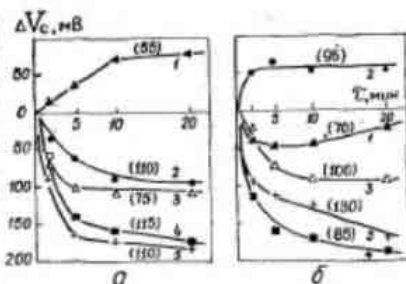


Рис. 13. Кинетика изменения КРП в процессе адсорбции на металле присадок из масла [70]: а—загущенное масло; б—минеральный компаунд М-1

Присадки: 1—АВС-2; 2—ТКФ; 3—ЛЗ-3Н; 4—КП; 5—Смесь; 6—время выдержки в масле (в скобках указана критическая нагрузка заданной для масла на четырехцилиндровой машине трения, кг)

<sup>1</sup> Такая подготовка образцов рекомендована в [71].

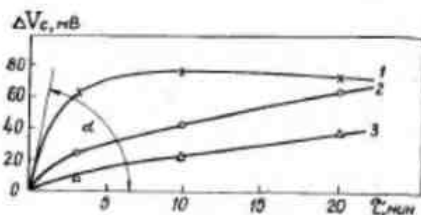


Рис. 14. Адсорбционные кривые для Ст3 при взаимодействии с топливом разных марок [69]: 1—топливо Т-1; 2—ТС-1; 3—ТС-1Г

зует защитную смазочную пленку особенно быстро (практически мгновенно), тогда как формирование подобной пленки в случае серосодержащей присадки требует довольно значительного времени [70].

Построение изотерм адсорбции дает возможность оценивать смазочную способность топлив и принимать меры по ограничению износа трущихся деталей топливной аппаратуры. Так, согласно адсорбционным кривым, приведенным на рис. 14, из трех исследованных топлив наилучшими смазочными свойствами, с точки зрения величины и скорости изменения работы выхода электрона, должно обладать топливо Т-1, а самыми низкими показателями — топливо ТС-1Г, что подтвердилось в ходе эксплуатационных испытаний, а также в опытах по одновременному измерению коэффициента трения и работы выхода электрона [69]. Наиболее ценным результатом этих опытов является впервые установленная корреляционная связь между  $\Delta\mu$  и  $\Delta\varphi$ : чем существеннее изменение работы выхода, тем сильнее изменяется и коэффициент трения.

Величина  $\Delta V_c$  определяет изменение разности работ выхода двух металлов, из которых лишь один может быть принят в качестве стандартного. Поэтому при сравнительной оценке адсорбционной способности смазочных материалов по кривым  $\Delta V_c = -\psi(\tau)$  необходимо сначала убедиться в том, что они получены с одним и тем же металлом-адсорбентом. При нанесении смазки на различные металлы правильнее, вероятно, пользоваться таким критерием адсорбционной способности смазочного состава, как величина  $\delta_{акс} = \frac{\Delta V_c}{\Delta V_{c(0)}}$ , на что указывается в работе [68].

Как это следует из рис. 15, например, влияние бензина А-66 с антистатической присадкой «сигбол» на работу выхода электрона выражено сильнее у стали, чем у сплава алюминия (сплошные кривые 2), в то время как сами значения  $\Delta V_c$  оказались для стали ниже, чем для алюминиевого сплава, более чем в 2 раза (пунктирные кривые 1).

показал анализ адсорбционных кривых и результатов испытаний масел с присадками на четырехшариковой машине трения, хлорсодержащие соединения («совол», ХП) превосходят по адсорбционной способности и противозносным свойствам все другие изученные присадки. Хлорсодержащая присадка образует защитную смазочную пленку особенно быстро (практически мгновенно), тогда как формирование подобной пленки в случае серосодержащей присадки требует довольно значительного времени [70].

Антистатические присадки вводят в топливо для предотвращения взрывоопасной ситуации, возможность появления которой связана с накоплением больших электрических зарядов при заправке топливных систем. При изучении вопроса о влиянии процентного содержания присадки «сигбол» в бензине на величину  $\Delta V_c$  Стародубовская и Авдентова наблюдали значительные расхождения в значениях  $V_{c(0)}$  для стали Ст3, применявшейся в качестве адсорбента. Поэтому для статистического подсчета, результаты которого приведены на рис. 16, были использованы данные опытов с наиболее часто повторяющимися значениями  $V_{c(0)}$ , находящимися в интервале 220–260 мВ.

Аналитическая обработка экспериментальных данных позволила авторам выразить зависимость  $\Delta V_c = F(C_n)$  уравнением вида

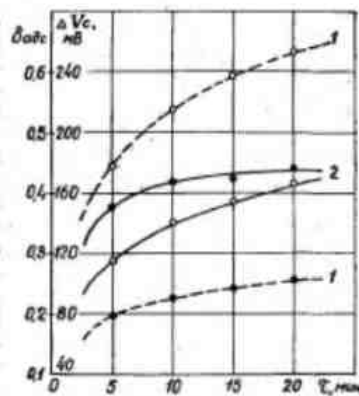


Рис. 15. Абсолютное ( $\Delta V_c$ ) и относительное ( $\delta_{акс}$ ) изменение контактной разности потенциалов в зависимости от времени нанесения адсорбата на поверхность стали (●) и сплава алюминия (○) [68]: 1— $\Delta V_c - \psi(\tau)$ ; 2— $\delta - f(\tau)$

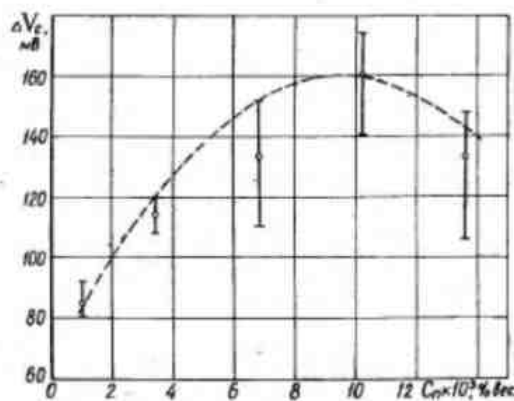


Рис. 16. Зависимость  $\Delta V_c$  от концентрации антистатической присадки в бензине [68]

$$\Delta V_c = -1,032 \cdot 10^6 C_n^2 + 19,73 \cdot 10^3 C_n + 65,28. \quad (2.3)$$

Нетрудно видеть, что параболическая кривая, построенная по этому уравнению (показана на рис. 16 пунктиром), не выходит за пределы отклонения величины  $\Delta V_c$  от средней статистической. Наличие максимума на кривой говорит о существовании некоторой оптимальной концентрации присадки, при которой скорость формирования адсорбционного слоя считается наибольшей.

Параболический характер зависимости  $\Delta V_c = F(C_n)$  авторы объяснили следующим образом. Переход молекул из объемной фазы на поверхность металла означает резкое изменение условий их существования. Поскольку энергия активации молекул присадки много меньше таковой для частиц, входящих в состав чистого нефтепродукта, то при формировании адсорбционного слоя концентрация бензина в нем убывает значительно быстрее, чем растет концентрация присадки. Будь адсорбционный слой сформирован только из молекул бензина или из молекул присадки, мы бы имели  $\Delta V_c = \alpha C_b$  или  $\Delta V_c = \beta C_n$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, зависящие от энергии активации. В случае же двухфазной системы (бензин+присадка), если учесть, что  $C_b \gg C_n$  и  $\alpha \gg \beta$ , выражение для полного изменения контактной разности потенциалов можно представить в виде

$$\Delta V_c = \alpha (C_b - C_n^m) + \beta C_n = -\alpha C_n^m + \beta C_n + \alpha C_b. \quad (2.4)$$

Аналогия уравнения (2.4) с эмпирической формулой (2.3) говорит, вероятно, о правильности ее молекулярно-физической интерпретации.

О точно воспроизводимом изменении скачка контактного потенциала  $\Delta V_c$  при нанесении определенного граничного слоя на определенную поверхность металла сообщается в работе Учуваткина [11]. Одновременно с измерениями  $V_{св}$  и  $V_{(идс)}$  определялись силы аттракционного электромагнитного взаимодействия металлов при граничном трении гомогенных пар (см. гл. I, § 2), а также коэффициент линейной упругости фрикционного контакта<sup>1</sup>. Эксперименты показали, что между работой выхода электрона и указанными параметрами существуют корреляционные связи. Так, из определенной совокупности металлов, входящих в IV период таблицы Менделеева (Cr, Ni, Cu, Zn), работа выхода  $\phi$ , удельная сила притяжения конденсированных фаз  $p_m$  и коэффициент упругости  $k$  достигают наибольшей величины у хрома, несколько меньшей — у никеля и наименьшей — у меди и цинка, т. е. при переходе к металлам I и II групп.

Исследуя в тождественных условиях функцию  $F=f(N)$  для различных гомологов жирных кислот и зависимость КРП от

<sup>1</sup> Для нахождения физико-химических констант, характеризующих состояние контакта, был использован метод резонансных кривых, идея которого была высказана Л. И. Мандельштамом и реализована С. Э. Хайюшим с сотр. [32].

числа атомов углерода  $z$  в молекулах этих кислот. Учуваткин пришел к выводу о линейном характере зависимости между  $\Delta \mu$  и  $\Delta V_c$ . Как это вытекает из рис. 17, однако, говорить о пропорциональности величин  $\Delta \mu$  и  $\Delta V_c$  можно пока лишь в самом первом приближении; в то же время есть все основания предполагать, что закономерность изменения  $\Delta \mu$  с изменением  $\Delta \phi$  (или  $\Delta V_c$ ), обнаруженная Марковым для сплавов с применением технических смазок, является общей для всех материалов, как смазочных, так и образующих фрикционную пару.

Гаркуновым, Марковым и Голяковым [72] изучался вопрос о взаимосвязи окислительно-восстановительных реакций в парах трения с разностью работ выхода компонент, из которых формируется фрикционный контакт.

Цель состояла в том, чтобы дать объяснение явлению атомарного переноса и научиться им управлять. К тому времени считалось установленным, что при трении медных сплавов о сталь в среде глицерина или спирто-глицериновой смеси происходит атомарное выделение меди из твердого раствора сплава и ее постепенный взаимный перенос с одной поверхности на другую. Представление о механизме выделения меди в дальнейшем потребовало уточнения, так как первая стадия процесса более напоминает сохранение на поверхности сплава медной «губки» при селективном переходе в смазку легирующих элементов (Mn, Al, Zn и др.). Речь, в сущности, идет о самопроизвольном анодном растворении, когда роль катода при некотором компромиссном потенциале сплава играет полублагородный металл (Cu). Что касается взаимного переноса меди, то его реальность подтверждалась все новыми и новыми опытами. Очень малые значения сил трения и отсутствие повреждения сопряженных поверхностей, характерные для такого переноса, называемого сейчас избирательным (см. § 8 этой главы), принципиально отличали его от известного явления схватывания металлов, на что указывалось Гаркуновым и Крагельским [73]. Атомарный перенос наблюдался также в среде консистентной смазки ЦИАТИМ, масла АМГ-10 и др.

По электроотрицательности ( $\chi$ ) металлов и легирующих элементов сплавов можно попытаться предсказать, по какому пути пойдет химическое модифицирование дорожки трения. Однако, если рассматривать такое модифицирование как процесс перехода поверхности в более стабильное термодинамическое со-

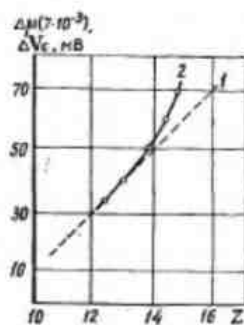


Рис. 17. Зависимость изменения коэффициента трения (1) и КРП (2) стали от числа атомов углерода в молекулах жирных кислот (по данным [11]).

стояние, то в качестве критерия степени пассивности или, наоборот, активности трущейся поверхности удобно принять работу выхода электрона ( $\phi$ )<sup>1</sup>. Применительно к паре трения это означает целесообразность измерения контактного потенциала  $V_c \sim \phi_{\text{ак}} - \phi_{\text{п}}$  для каждого из металлов, о чем и говорят результаты работы [72].

Проанализировав данные, приведенные в табл. 2, нетрудно было прийти к выводу, что для каждой смазочной среды можно построить свой ряд контактных потенциалов.

Таблица 2  
Контактная разность потенциалов по отношению к золоту, мВ [72]

Материал	Очищенная поверхность	После известного срока (часы) *			
		АМГ-10	ЦИАТИМ-201	МС-80	Глицерин
Электролитической хром	148	128/148	-120/-80	180/180	164/168
Сталь 30ХГСА	192	156/172	-540/-368	232/232	360/368
Бронза БрАЖМц	276	280/290	284/292	356/360	264/264
Латунь ЛС 59-1	244	224/240	100/144	260/264	312/316
Медь М-1	192	136/156	-8/60	216/216	212/216
Сталь 1Х18Н9Т	216	260/276	56/96	328/320	300/312

\* В числителе — непосредственно после измерения; в знаменателе — спустя 30 с.

Такой ряд, по мнению авторов, и дает возможность предвидеть, на каком из металлов пары будет происходить восстановление окислителя и какой из них должен окисляться при трении. Для этого считается достаточным воспользоваться методом изображения самопроизвольного окисления металлов при помощи поляризационных кривых, разработанного Фрумкинским с сотр. [75].

В качестве одного из примеров авторами рассматривается случай прогнозирования процессов в паре трения 30ХГСА — БрАЖМц, предназначенной для работы в среде глицерина. Отмечается, что до тех пор, пока  $V_{\text{акт}} > V_{\text{кр}}^{\text{окс}}$  (оба контактных потенциала имеют по отношению к золоту положительное значение, см. табл. 2), бронза должна окисляться, а на поверхности стали будет восстанавливаться чистая медь. После того как поверхность стали покроется тонким слоем металлической меди, восстановление меди начнет происходить на бронзе, так как для самообразовавшейся пары Си — БрАЖМц имеем  $V_{\text{акт}} > V_{\text{кр}}^{\text{окс}}$ . Перенос меди между трущимися поверхностями прекратится, когда обе они окажутся омедненными и КРП пары Си — Си будет равна нулю.

<sup>1</sup> Заметим, кстати, что, согласно [74],  $\phi = 0,75 + 2,5x$ .

Относительно такой теоретической трактовки результатов атомарного переноса, полученных авторами при испытаниях образцов на машинах трения, по меньшей мере следует сказать, что она не является единственно возможной или нуждается в дополнительной расшифровке, о чем, кстати, говорят и последующие работы самих ее авторов<sup>1</sup>. Действительно, рассматривая фрикционную систему *медный сплав — глицерин — сталь* как короткозамкнутый гальванический элемент<sup>2</sup>, необходимо помнить, что наряду с контактной разностью потенциалов его э. д. с. включает разность потенциалов, возникающих на границах раздела металл — электролит. Поляризационная диаграмма отражает в этом случае процесс совместного самопроизвольного окисления одним окислителем двух различных (до обоюдного омеднения) металлов, находящихся в контакте. Именно чрезвычайно медленное растворение стали в глицерине обеспечивает ей положительный потенциал по отношению к ускоренно окисляющейся бронзе, из которой, ионизируясь, уходят в смазку атомы легирующих элементов, а атомы меди, объединяясь в группы, переносятся на сталь [76].

Естественно, что в условиях, когда глицерин функционирует как слабая кислота, контактная разность потенциалов, оказавшись одной из основных компонент э. д. с., может резко изменить характер избирательной электрохимической коррозии. От величин  $\phi_{\text{Мед}}$  и  $\phi_{\text{Сталь}}$  будет зависеть, в каком направлении пойдет процесс — по пути растворения или пассивации медного сплава. В этом смысле данные работы [72] представляют несомненный интерес.

Под пассивацией медного сплава здесь имелось в виду появление на его поверхности сервопитной пленки меди, предотвращающей возможность дальнейшего растворения. Однако образование такой пленки нередко осложняется переходом сплава в пассивное состояние в результате появления на нем кислородного барьера непосредственно в растворе электролита. Больше того, после первоначального пребывания на воздухе, что почти всегда бывает на практике, компоненты фрикционной пары уже покрыты кислородным барьером, состоящим из участков фазового окисла, квазикристаллического предельного окисла и адсорбированного кислорода. Реализация условий, благоприятных для инициирования избирательного переноса, предполагает в качестве первого шага удаление такого барьера.

С другой стороны, как известно, окисная пленка выполняет смазочную функцию, зависящую от ее толщины. Уже первые грани кристаллических решеток окислов обуславливают сильный экранирующий эффект: сцепление металлов ослабевает

<sup>1</sup> Например, [69].

<sup>2</sup> Модель фрикционной системы *металл I — электролит — металл II* в виде короткозамкнутого гальванического элемента была предложена автором в работе [14].



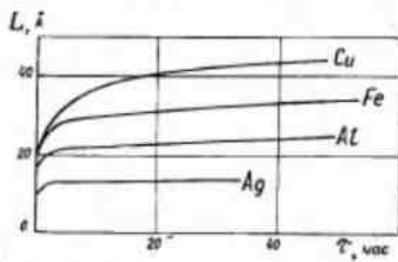


Рис. 18. Толщина оксидных пленок, образующихся на различных металлах при комнатной температуре [78]

в несколько раз; более толстая оксидная пленка с явно выраженным собственным строением изменяет коэффициент трения в соответствии с ее объемными характеристиками [43, 77]. Спрашивается, каким же образом окисление металлической поверхности сказывается на работе выхода электрона? Хотя этот вопрос и затрагивался в работе [69], что, кстати, отме-

чено выше, наиболее четкий и обоснованный ответ на него был дан в работе [12]. На нем мы и остановимся.

Характерными для образования оксидных пленок при комнатной температуре являются малая их толщина и очень большая скорость роста при первом контакте с атмосферой ювенильной поверхности металла (рис. 18).

Согласно современным представлениям скорость роста на начальных стадиях окисления в основном определяется: а) дрейфом ионов металла к границе окисел — газ в сильном электрическом поле, появляющемся в тонкой оксидной пленке в результате туннельного выхода электронов на внешнюю поверхность окисла и их захвата адсорбированными атомами кислорода [79, 80]; б) ускоренным перемещением ионов по дефектам кристаллической решетки оксида [81]; в) диффузией ионов при локальных перегревах за счет теплоты экзотермической реакции окисления [82].

Если следовать, например, модели Мотта — Кабрера, то появление на оксидной пленке поверхностного отрицательного заряда благодаря туннельному выходу электронов должно создавать дополнительный потенциальный барьер, увеличивающий работу выхода. Как это видно из табл. 3, однако, зачистка металлической поверхности на воздухе приводит к значениям  $\phi_{\text{ом}}$  не только большим, но и меньшим, чем соответствующие значения  $\phi^1$ . Из исследованных металлов работа выхода после зачистки изменялась особенно сильно у титана (+0,56 эВ) и алюминия (-0,6 эВ). Евдокимов и Семов [12] подчеркивают, что такие изменения не могут быть результатом лишь одной деформации металлов (этот фактор, естественно, учитывается

[83])<sup>1</sup> и что их причиной является также образование оксидных и адсорбционных слоев. Оценка дебаевской длины экранирования  $L_D$  для оксидных пленок дает значения порядка  $10^3 \text{ \AA}$ , что обычно намного превышает их толщину  $L$ . Отсюда напрашивается вывод, что при окислении в атмосферных условиях работа выхода металлической поверхности либо не должна изменяться вовсе, либо может только увеличиваться (примерно до 0,5 эВ [84]) из-за отрицательного заряжения поверхности при адсорб-

Таблица 3

Работа выхода металлических поверхностей, эВ [12]

Металлы	Чистая поверхность в вакууме	Поверхность на воздухе через 1 мин после зачистки	Линно окисленные поверхности
	$\phi$	$\phi_{\text{ом}}$	$\phi_{\text{ом}}$
Al	4,25	3,65	4,04
Mg	3,64	3,80	3,61
Zn	4,24	3,94	4,25
Cd	4,10	4,30	4,20
Sa-	4,38	4,35	4,31
Nb	3,99	4,06	4,76
Ti	3,95	4,51	4,68

ции кислорода и паров воды. Это и наблюдалось при исследовании окисленных поверхностей, но не во всех случаях (см. табл. 3). У алюминия, например, несмотря на то что при  $L \ll L_D$  для него подтвердилась модель Мотта — Кабрера, работа выхода после зачистки не увеличивается, а уменьшается. Авторы объясняют это кажущееся противоречие с привлечением зонной модели оксидной пленки, содержащей поверхностные зоны Тамма [85]. Хотя в реальных системах металл — окисел основную роль играют не таммовские уровни, существование которых было установлено для весьма идеализированной модели [4], а уровни, обусловленные дефектами металлической подложки, природа поверхностных состояний не является здесь важным звеном в общей цепи рассуждений.

Поверхностные состояния ( $S$ -уровни) локализованы в непосредственной близости к границе раздела металл — окисел, как это показано на энергетических схемах рис. 19. Для удобства объяснения оксидная пленка вначале условно отделена от металла, а ее поверхностный заряд считается равным нулю (рис. 19, а). Поскольку часть поверхностных состояний, расположенных ниже уровня Ферми, заполнена электронами, то при возникно-

<sup>1</sup> Работа выхода окисленного металла  $\phi_{\text{ом}}$  определялась посредством измерений КРП с использованием в качестве материала для электрода сравнения окисленного никеля ( $\phi_{\text{ни}} = 4,87 \text{ эВ}$ ).

<sup>1</sup> О деформационном искажении электронного энергетического спектра твердых тел говорится в следующем параграфе.

вении контакта между металлом и оксидом поверхностные состояния будут разряжаться при  $\varphi_m > \varphi_0$  или заряжаться при  $\varphi_m < \varphi_0$ , пока не совпадут фермиевские уровни металла и оксида. Нетрудно видеть, что рис. 19, б соответствует случаю, когда работа выхода металла больше работы выхода оксида, и, таким образом, окисная пленка должна зарядиться положительно. Как это следует из рис. 19, б, высота потенциального барьера на границе металл — оксид

$$\psi = \varphi_m - \chi - V_S, \quad (2.5)$$

где  $\chi$  — энергия сродства оксида к электрону;  $V_S$  — положительный потенциал, до которого зарядилась окисная пленка.

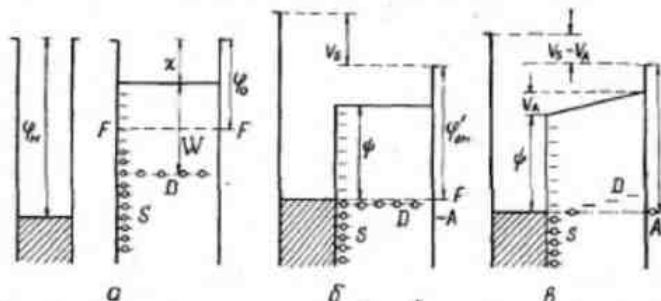


Рис. 19. Изменение работы выхода металла при покрытии его тонким слоем оксида ( $L \ll L_D$ ) [12]:

а — металл и окисная пленка условно разделены; б — положительное заряджение окисной пленки при опустошении уровней поверхностных состояний S; в — отрицательное заряджение поверхности при заполнении уровней A адсорбированного кислорода

Допустим теперь, что в результате заполнения электронами уровней A адсорбированного кислорода (за счет туннельного выхода электронов из металла или опустошения донорных центров D) внешняя поверхность оксида оказалась отрицательно заряженной. Тогда ее потенциал изменится на величину  $V_A$ , и, согласно рис. 19, в, работа выхода окисленной металлической поверхности

$$\varphi_{\text{см}} = \psi + \chi + V_A, \quad (2.6)$$

или, с учетом (2.5),

$$\varphi_{\text{см}} = \varphi_m - V_S + V_A. \quad (2.7)$$

Следовательно, при  $\varphi_m > \varphi_0$  ( $V_S > 0$ ) работа выхода металла по мере его окисления может как увеличиваться, так и уменьшаться — все это зависит от соотношения между величинами  $V_S$  и  $V_A$ . Очевидно также, что при  $\varphi_m < \varphi_0$  ( $V_S < 0$ ) окисление металла должно приводить только к увеличению работы выхода,

с чем, вероятно, и связаны результаты, полученные при исследовании титана.

Интересным моментом, на который авторы также обратили внимание, является то обстоятельство, что наряду с общим повышением или понижением работы выхода окисляющейся поверхности на ней возможны локальные понижения величины  $\varphi_{\text{см}}$ . Расположены эти понижения преимущественно в местах скопления дефектов, где облегчен выход положительных металлических ионов на поверхность растущего оксида (рис. 20). Мы видим, как чутко реагирует работа выхода даже на весьма слабое изменение электрофизического состояния поверхности.

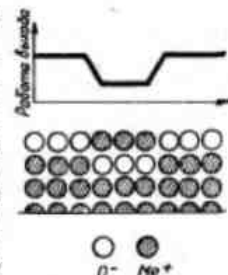


Рис. 20. Локальные понижения работы выхода металла при окислении [12]

## § 2. Эмиссия электронов

С изменением работы выхода электрона тесно связано явление, определяемое терминем «экоэлектронная эмиссия» (эффект Крамера)<sup>1</sup> и состоящее в испускании электронов с поверхности твердых тел в результате изменения их энергетического спектра при различного рода воздействиях. Установлено, в частности, что вероятность преодоления электронами потенциального барьера может резко возрасти при фазовых превращениях, окислении, механических воздействиях на воздухе (деформация, царапание, раскалывание), повышении температуры предварительно возбужденного твердого тела (термостимуляция), обработке его поверхности в тлеющем разряде, электромагнитном облучении ( $\gamma$ , рентгеновском, ультрафиолетовом), бомбардировке  $\alpha$ -частицами.

Многообразие проявлений эффекта Крамера породило, естественно, ряд гипотез, предложенных для объяснения его механизма (краткий обзор этих гипотез см. в [12]). Считается, например, что экоэлектроны способны возбуждаться за счет скрытой теплоты фазовых превращений [87], за счет теплоты хемосорбции газов [88] или энергии химической реакции между агрессивной газовой средой (хлором, кислородом, фтором) и чистой металлической поверхностью [89], за счет энергии дефектов кристаллической решетки растущего оксида<sup>2</sup>, передаваемой по-

<sup>1</sup> Название «экоэлектронная эмиссия» утвердилось в научной терминологии по решению совещания в Инсбруке [86], но оно в основном не отражает физической сути явления, систематические исследования которого были начаты И. Крамером в 1950 году [87].

<sup>2</sup> Такие дефекты рассматриваются как особые F'-центры, аналогичные центрам окраски щелочно-галогенных кристаллов [90].

средством же механизма другим поверхностным состоянием с низким потенциальным барьером, препятствующим вылету электронов [91], за счет энергии, выделяющейся при аннигиляции выходящих на поверхность вакансий [92], за счет механической энергии деформации, аккумулируемой активными центрами с пониженной работой выхода в окрестностях дефектов структуры [93, 94].

Опираясь на эти и другие известные представления, попытаемся написать уравнение электронной эмиссии в наиболее общем виде.

Пусть  $W_{F(0)}$  — энергия Ферми электронов в твердом теле с идеальной структурой при  $T=0^\circ\text{K}$ . У такого же по природе реального твердого тела, имеющего дефектную структуру и оказавшегося в обычных температурных и атмосферных условиях, часть электронов находится в возбужденном состоянии, т. е. их энергия увеличилась по отношению к уровню Ферми на величину  $W_0$ , свою для каждого электрона, которую назовем начальной энергией возбуждения. В соответствии с характером энергетического воздействия энергию возбуждения обозначим: механическую —  $W_M$ , химическую —  $W_X$ , при ван-дер-Вальсовой адсорбции —  $W_A$ , ..., электромагнитную —  $W_Э$ , тепловую —  $W_T$ . Тогда уравнение электронной эмиссии будет иметь вид

$$W_0 + W_M + W_X + W_A + \dots + W_Э + W_T = \varphi + \frac{mv^2}{2}, \quad (2.8)$$

где  $\varphi_{\text{max}}$  — максимально возможная работа выхода.

Здесь уместно подчеркнуть совпадение уровня Ферми с тем энергетическим уровнем, вероятность заполнения которого равна  $1/2$ . Встречающееся в литературе определение уровня Ферми как наивысшего энергетического уровня, занятого электронами при абсолютном нуле температуры, в данном случае нас не устраивает. Для металлов, например, такое определение часто оказывается приемлемым только потому, что энергия теплового движения  $kT$  ( $\sim 0,025$  эВ при комнатной температуре) значительно меньше  $W_{F(0)}$  — энергии Ферми при абсолютном нуле ( $\sim 5$  эВ), что позволяет считать  $W_{F(T)} \approx W_{F(0)}$  и подходить к экспериментальному определению работы выхода как величины, не зависящей от температуры. Однако с учетом изложенного и особенно последней из перечисленных выше гипотез о механизме эффекта Крамера действительная (или эффективная) работа выхода является функцией начальной энергии возбуждения, зависящей от температуры и степени дефектности твердого тела<sup>1</sup>:

$$\varphi = \varphi_{\text{max}} - W_0, \quad (2.9)$$

<sup>1</sup> Степень дефектности кристаллической решетки определяется в основном ее дислокационной структурой, характеризуемой распределением и плотностью дислокаций.

Таким образом,

$$W_M + W_X + W_A + \dots + W_Э + W_T = \varphi + \frac{mv^2}{2}. \quad (2.10)$$

Энергетическое воздействие любой природы может стать непосредственной причиной эмиссии, и в этом, принципиальном, смысле все слагаемые, стоящие в левой части уравнения (2.10), ничем не отличаются друг от друга. Однако вклад каждого из слагаемых в суммарную энергию, достаточную для того чтобы электрон вылетел за пределы твердого тела с максимальной скоростью  $v$ , далеко не одинаков. Если какое-либо энергетическое воздействие является в данных условиях основным фактором, ответственным за внешнее возбуждение электрона, то оно может рассматриваться как инициатор электронной эмиссии. Воздействие, играющее роль побочного, способствующего эмиссии фактора, принято считать ее стимулятором.

Ясно, что эмиссия, в том числе на различных участках поверхности одного и того же твердого тела, может вызываться совокупностью основных и побочных факторов. Энергию, сообщаемую электрону при воздействии стимулирующего характера, удобно обозначить через  $\Delta W_Э$  (электромагнитное стимулирование<sup>1</sup>),  $\Delta W_T$  (термостимулирование),  $\Delta W_X$  (химическое стимулирование) и т. д. Тогда, используя уравнение (2.10), легко записать выражение для любого частного случая эмиссии. Например, уравнение термоэлектронной эмиссии, стимулированной окислением и электромагнитным облучением, будет иметь вид

$$W_T + \Delta W_X + \Delta W_Э = \varphi + \frac{mv^2}{2}; \quad (2.11)$$

для термостимулированной фотоэлектронной эмиссии получим

$$W_Э + \Delta W_T = \varphi + \frac{mv^2}{2}. \quad (2.12)$$

Если теперь попытаться составить уравнение для экзотермической эмиссии, то, не зная, какой вклад в энергию возбужденного электрона больше — обусловленный дефектами структуры, появившимися при деформации и облучении, или процессами окисления и адсорбции, мы вынуждены будем записать

$$W_M + W_Э + W_X + W_A = \varphi + \frac{mv^2}{2}. \quad (2.13)$$

Однако просто из того факта, что в исследованиях прикладного характера чаще встречается низкотемпературная эмиссия, инициатором которой является пластическая деформация, а явно выраженными стимуляторами — нагревание, окисление и осе-

<sup>1</sup> Фотостимулирование является одним из его вариантов.

ценне, очевидна целесообразность записи уравнения (2.13) в уже более конкретной форме:

$$W_M + \Delta W_T + \Delta W_X + h\nu = \varphi + \frac{mv^2}{2}. \quad (2.14)$$

Надо отметить, кстати, что в подавляющем большинстве случаев испускание экзоэлектронов оказывается вообще невозможным без дополнительной энергии квантов света. Как показал Евдокимов [96], выключение возбуждающей подсветки при трении металлов на воздухе приводит к безынерционному прекращению эмиссии, несмотря на развитие деформационных и химических процессов. Здесь мы, конечно, постоянно имеем в виду длинноволновое освещение ( $h\nu < \varphi$ ), чем и отличается фотостимулированная экзоэлектронная эмиссия от обычного фотоэффекта ( $h\nu > \varphi$ ).

Известно, что интенсивность экзоэмиссии резко увеличивается при фазовых превращениях первого и второго рода<sup>1</sup>. Несколько позже мы коснемся вопроса о том, почему эффект Крамера наблюдается при переходах второго рода, происходящих без скрытой теплоты. Что касается переходов первого рода и вообще любых энергетических скачков, связанных с внезапным освобождением накопленной энергии (тепловой, механической, электрической и др.), то в формуле экзоэлектронной эмиссии они могут быть учтены особо. Как это делать — путем выделения дополнительных слагаемых или путем введения соответствующих коэффициентов, рассматривая энергетические скачки в качестве мультипликаторов эмиссии, зависит пока от личных вкусов и интересов исследователя.

Нетрудно видеть, что механизм низкотемпературной эмиссии так же многогранен, как и совокупность весьма различных по содержанию явлений, ее вызывающих. Поэтому, когда речь идет о единстве взглядов на природу экзоэмиссии, то под ним следует, вероятно, понимать лишь признание одной и той же физической основы, общей для всех перечисленных выше механизмов, имея в то же время в виду, что каждый конкретный вид экзоэмиссии развивается по своему специфическому механизму. Но и здесь мы не будем последовательны до конца, если не обратим внимания на то обстоятельство, что общность энергетических воздействий с точки зрения обеспечения ими возможности преодоления электронами потенциального барьера распространяется на любой вид электронной эмиссии, какой бы она ни была — высокотемпературной (термоэлектронной) или низкотемпературной (экзоэлектронной).

Потребность четкой классификации различных видов эмиссии, в том числе в рамках, определяемых термином «экзоэлектронная эмиссия», становится все более очевидной. Как представ-

ляется автору, физической основой такой классификации должны быть те изменения в электронном энергетическом спектре твердого тела, которые вызываются как индивидуальным энергетическим воздействием, так и совокупностью таких воздействий, различных по своей физико-химической природе. Независимо от того, под влиянием каких факторов происходит перестройка электронной структуры — тепловых или механических воздействий, различного рода экзотермических реакций, электромагнитного облучения, бомбардировки потоком быстрых частиц и т. д., она приводит к изменению топологии поверхности Ферми, неизбежным следствием которого является изменение работы выхода. Уменьшение величины  $\varphi$  означает перевод электронов в «предстартовое» состояние. Если энергия, сообщаемая электрону, достаточна для преодоления потенциального барьера, то электрон вылетает за пределы твердого тела. Следует заметить, однако, что по мере развития некоторых конкурирующих энергетических процессов их роль как стимуляторов или даже инициаторов экзоэмиссии начинает быстро ослабевать. Больше того, такой процесс, например, как окисление, отражающий стремление поверхности перейти в пассивное состояние с образованием защитной экранирующей пленки, должен сопровождаться увеличением работы выхода. По-видимому, лишь в условиях, когда кислородный барьер отсутствует, а в результате коррозии металла на его поверхности возникают дефекты, может наблюдаться устойчивая экзоэмиссия в течение всего промежутка времени химического возбуждения. Что касается эмиссионных пиков, зарегистрированных при фазовых переходах второго рода, то их появление, вероятно, обусловлено такой перестройкой электронной структуры, при которой статистическая доля электронов, имеющих меньшую работу выхода, возрастает таким образом, что при одновременном увеличении статистической доли электронов с большей работой выхода внутренняя энергия системы, в отличие от ее термодинамического потенциала, сохраняется неизменной.

Исходя из этих представлений, нетрудно понять взаимное влияние процессов, протекающих в одних и тех же микрообъемах твердого тела, подвергнутого энергетическим воздействиям. Так, например, искажения электронного спектра металла при его пластической деформации влияют на характер и кинетику адсорбционного адаптивирования молекул смазочного состава или прямых химических реакций; в свою очередь заметные искажения распределения электронной плотности в твердом теле, вызываемые действием ван-дер-ваальсовых сил и особенно сил химической связи, облегчают развитие и протекание актов пластической деформации.

Электронное строение твердых тел является той физической платформой, которая позволила существенно продвинуться в объяснении механических, в частности прочностных, свойств

<sup>1</sup> См., например, [96].

твердых тел [97]. Работами недавнего времени показано, например, что электроны проводимости способны переходить от сжатых областей кристаллической решетки к областям с относительно большим межатомным расстоянием [98], что с электронной структурой металла связана энергия образования дефектов упаковки [99], что процесс металлизации межатомных связей является характерным для перехода от хрупкого разрушения к вязкому [100].

Согласно исследованиям Крюка [101], рассматривающего электронную эмиссию как деформационный эффект, о степени металлизации связей ковалентного кристалла при деформации (повышается концентрация свободных электронов) и, наоборот, о степени проявления гомеоплярной компоненты при значительной деформации металлического кристалла (снижается концентрация электронов проводимости) можно судить по виду экзоэмиссионных кривых. Такой вывод находится в полном соответствии с обнаруженной ранее закономерностью в поведении  $\varphi$  при изменении характера сил сцепления в кристаллической решетке [102]. При постановке вопроса об информационном содержании кривых, изображающих зависимость интенсивности экзоэмиссии ( $I$ ) от времени и температуры, автор работы [101] использовал как раз то обстоятельство, что деформация твердых тел с полярным типом межатомных связей — чисто металлической и ковалентной — приводит к противоположным по реакции на воздействие результатам: развитой пластической деформации у типичных металлов и хрупкому разрушению у типичных диэлектриков. Основываясь на предположении, что характер указанных процессов определяется относительной способностью субмикрочастиц решетки к диссипации и аккумуляции энергии деформации [103], Крюк подчеркивает, что эта энергия «в пределах группировки из нескольких атомов (ионов) в первую очередь воспринимается электронами, участвующими в осуществлении межчастичного сцепления в решетке». Другими словами, образование дефектов в кристалле начинается с искажения его электронной структуры. В отличие от металлов, где энергия деформации быстро рассеивается благодаря относительной свободе и высокой концентрации коллективизированных электронов, диэлектрики, как, впрочем, и полупроводники с явно выраженной гомеоплярной составляющей, склонны, напротив, к быстрому накоплению механической энергии вплоть до критической величины: направленность и жесткость ковалентных связей являются причиной хрупкого разрушения. Зависимость уровня диссипации энергии от электронного строения твердых тел и была подтверждена кривыми экзоэмиссии, приведенными в работе [101].

Анализ теоретического и экспериментального материала по изучению эффекта Крамера, в частности данных рис. 21 и 22, говорит в пользу предположения о том, что экзоэлектронная

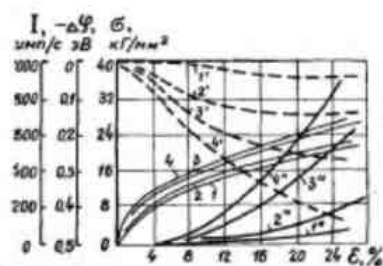


Рис. 21. Влияние пластической деформации на упорочение  $\phi$  (1—4), изменение работы выхода электрона  $\Delta\varphi$  (1'—4') и экзоэмиссию медных сплавов I (1'—4') [93]: 1, 1' — для Cu; 2, 2' — Cu+2,5%Al; 3, 3' — Cu+4,2%Al; 4, 4' — Cu+7,4%Al

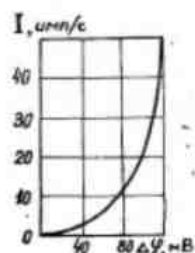


Рис. 22. Зависимость экзоэмиссии Ag от изменения работы выхода при растяжении [94]

эмиссия, как показатель термодинамической нестабильности металлической поверхности, вызывается искажениями электронного энергетического спектра твердого тела и последующей перестройкой его электронной структуры, связанной с появлением дефектов. Как наиболее дееспособную с точки зрения образования дефектов и их размножения, пластическую деформацию следует полагать основным видом энергетического воздействия, ответственным за эмиссию экзоэлектронов<sup>1</sup>.

Мицк [93] пишет: «Подход к явлению деформации как возбуждению имеет большое значение для выяснения роли механических взаимодействий межчастичных элементов структур, что создает условия для количественной оценки регулируемого воздействия на упорочение металлов с помощью механической энергии, электрических и магнитных полей, а также радиоактивных облучений». Правильность этого прогноза подтверждается развитием новых способов упорочения материалов путем их лазерной обработки, магнитной обработки (см. гл. VII) и т. п.

При трении металлов протекает сложный комплекс взаимосвязанных явлений: механических, тепловых, химических, электромагнитных и др. Однако прежде всего трение — процесс деформационный и, как таковой, должно сопровождаться значительным увеличением плотности дислокаций в поверхностных слоях трущихся тел и, следовательно, экзоэлектронной эмиссии при ее стимулировании (или мультиплицировании) внешней подсветкой, искусственным подогревом, самопроизвольным окислением, фазовыми превращениями и т. д. Именно с точки зрения дислокационных представлений, если считать, что актив-

<sup>1</sup> Плотность дислокаций при пластической деформации увеличивается в среднем на четыре порядка (например, от  $10^7$  см<sup>-2</sup> до  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>).

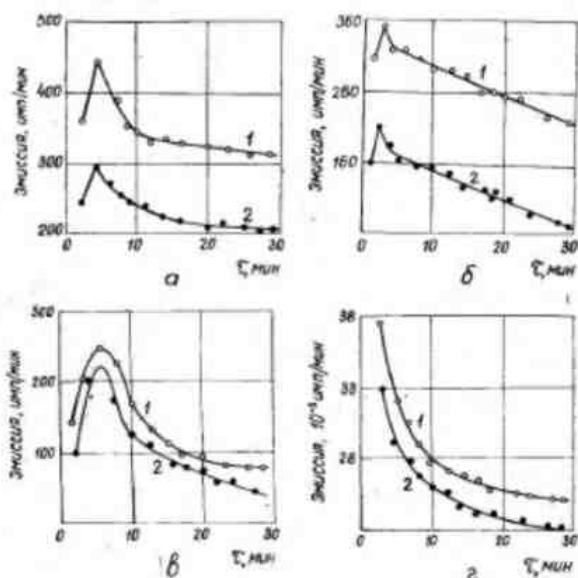


Рис. 23. Ход эклектроэлектронной эмиссии с поверхности образцов из стали 25 (а), стали 45 (б), чугуна СЧ15-32 (в) и алюминия (г) после реверсивного (1) и одностороннего (2) трения без смазки [12]

ными центрами эмиссии являются места, где концентрируются дефекты кристаллической структуры, удается объяснить, почему деформационное возбуждение может преобладать над любым другим возбуждением атомов решетки, выражающимся в забрасывании слабосвязанных электронов на более высокие энергетические уровни. Как раз в этом плане начаты и проводятся систематические исследования эклектроэмиссии при трении скольжения Елдокимовым с сотр. [12].

В связи с тем что при знакопеременных сдвиговых деформациях происходит постоянная разориентация блоков и зерен металла и, как следствие, интенсивное образование дефектов и новых поверхностей, ожидалось, что реверсивное трение будет повышать свободную поверхностную энергию и снижать работу выхода электрона в большей степени, чем одностороннее. Обнаруженная зависимость электроэлектронной эмиссии от реверсивности трения [104] полностью подтвердила это предположение. Как показывают кривые  $I=f(\tau)$ , полученные при статических испытаниях с возбуждающей ультрафиолетовой подсветкой (рис. 23),

уровень эклектроэмиссии после реверсивного трения неизменно выше, чем после одностороннего скольжения в тех же условиях. Согласно [12], одной из вероятных причин появления на кривых начальных пиков является хемосорбция кислорода и влияние его соединений с металлом на работу выхода электрона. В опытах с образцами из стали или чугуна, например, временное увеличение  $I$  может быть связано с уменьшением работы выхода при образовании закиси железа, после чего интенсивность эмиссии спадает из-за поглощения электронов в толще растущего окисла.

Особый интерес вызывают исследования Елдокимова с сотр., направленные на изучение общих закономерностей эклектроэлектронной эмиссии при трении в динамических условиях испытаний<sup>1</sup>. Непрерывная регистрация эклектроэмиссии непосредственно в процессе скольжения дает, разумеется, несравненно большую информацию об энергетическом состоянии трущихся поверхностей. Свободные для доступа участки поверхности, только что служившие ареной фрикционного взаимодействия, какое-то время сохраняют следы бурно протекавших на них дислокационных процессов (размножение дислокаций, их движение и взаимодействие, дислокационные реакции). На этих участках по мере их обнажения сразу же начинает развиваться процесс окисления, ускоряемый повышением температуры поверхности за счет собственного теплового эффекта и теплового эффекта деформации, зависящего от режима скольжения. Именно здесь, согласно изложенным выше представлениям, следует ожидать как общего изменения работы выхода электрона (по всей окисляемой поверхности), так и локальных ее понижений. Эти участки можно было бы назвать фото- и термостимулированной механо-химической эмиссией, если учесть, что для вылета возбужденных электронов необходима еще и энергия квантов подсветки.

К факторам, вызывающим спад эклектроэмиссии, относятся: а) экранирующее действие окисной пленки, выражающееся, по-видимому, в том, что при опустошении в ней донорных центров она превращается в своеобразную ловушку для электронов, вылетающих из металла; б) исчезновение локальных понижений работы выхода в завершающей стадии реакции окисления [12]; в) перестройка поверхностной дислокационной структуры металла в направлении повышения ее термодинамической стабильности.

Последний фактор, как нам представляется, имеет решающее значение. Аннигиляция разноименных (по знаку) дислокаций, уменьшение концентрации вакансий и другие подобные процессы, от которых зависит понижение поверхностной энергии, характеризуют изменение степени дефектности твердого тела.

<sup>1</sup> Результаты этих исследований, опубликованные в разное время, нашли отражение в работе [12].

подвергнутого упруго-пластической деформации и предоставленного после этого самому себе. Образно говоря, происходит «за-рубцовывание» испускающих электроны «ран», нанесенных поверхности при трении выступами шероховатости контртела на участках фактического контакта. Чем меньше промежуток времени между деформацией трением и регистрацией вызванной ею



Рис. 24. Влияние изменяющейся нормальной нагрузки при трении на экзоэмиссию (I) и микротвердость (II) для стали 45 [12]:  
I—13,2 нГ; II—36,4 нГ; III—59,8 нГ (скорость 1,5 м/с)

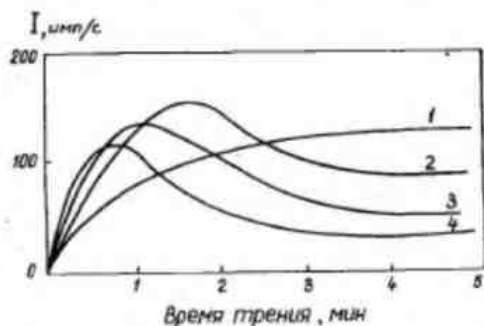


Рис. 25. Влияние скорости скольжения на экзоэмиссию стали 25 при трении без смазки под нагрузкой 26,4 нГ [12]:  
1—1,5 м/с; 2—2,7 м/с; 3—4,5 м/с; 4—6,3 м/с

эмиссии, тем с большей достоверностью мы можем судить об энергетическом состоянии трущихся участков поверхности по кривым экзоэлектронной эмиссии.

Такие кривые для сталей, отражающие влияние на экзоэмиссию факторов нагрузки, скорости и реверсивности движения, приведены на рис. 24, 25 и 26 соответственно.

Идентичный вид кривых экзоэмиссии и микротвердости на рис. 24 позволил предположить [12], что по характеру изменения кривой  $I=f(\tau)$  можно судить о степени наклепа поверхностных слоев в динамике трения. Действительно, на участке I происходит приработка поверхностей, при которой размножение и развитие дефектов структуры сначала опережает их аннигиляцию. Естественно, что увеличение плотности дислокаций и появление новых дислокационных сеток (как известно, очень устойчивых) сопровождается увеличением микротвердости поверхности трения и повышением уровня эмиссии. Происходит это до тех пор, пока не наступит равновесие между конкурирующими процессами упрочнения и отдыха. С ростом нормальной нагруз-

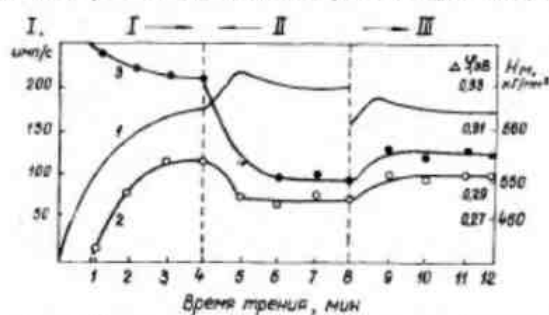


Рис. 26. Влияние реверсивности скольжения на свойства поверхности трения образцов из стали 45 (13 нГ; 1,5 м/с) [12]:  
1—экзоэмиссия; 2—микротвердость; 3—КРП

ки и, стало быть, повышением температуры поверхности (участки II и III) зона пластической деформации, испытывавшая предельно упрочненное состояние, несмотря на втянутые в нее дополнительно нижележащие слои металла<sup>1</sup>, начинает разупрочняться намного быстрее, что проявляется в снижении микротвердости и уровня экзоэлектронной эмиссии.

Экспериментальные кривые на рис. 25 объясняются следующим образом [12]. С ростом скорости скольжения сокращается время приработки поверхностей, т. е. время наиболее интенсивного развития сдвиговых деформаций, генерирования дефектов структуры, появления очагов хемосорбции и повышения температуры активных центров эмиссии. Поэтому крутизна кривых I—4, отражающих способность термостимулированных экзоэлектронов пролетать сквозь тончайшую окисную пленку, уве-

<sup>1</sup> У сталей с большой восприимчивостью к наклепу кратковременное упрочнение таких слоев при дискретном увеличении нагрузок вызывает появление пика на кривой экзоэмиссии [12].

личивается. В то же время чем больше значение  $v$ , тем быстрее кривая  $I=f(\tau)$  достигает своего максимума и круче начинает спадать, что связывается с дальнейшим развитием процесса окисления стали, приводящим к образованию, наряду с закисью железа ( $FeO$ ), закись-окиси ( $Fe_3O_4$ ) и окиси железа ( $Fe_2O_3$ ), создающих дополнительный потенциальный барьер, препятствующий вылету электронов. Происходящее при этом увеличение работы выхода Евдокимов [105] считает проявлением «как бы экранирующего» действия образовавшихся на поверхности химических соединений и пишет: «Такое действие окисла на процесс эмиссии с увеличением скорости скольжения, а следовательно, с ростом температуры и скорости окисления становится преобладающим над одновременно протекающим термостимулированием электронов». С этой точкой зрения можно согласиться, однако трактовка характера кривых 2—4 была бы, вероятно, полной и даже более точной, если бы в ней была учтена конкуренция процессов упрочнения и отжига, как это имело место в предыдущем случае.

С необходимостью учета такой конкуренции Евдокимов встречается снова [106], когда анализирует поведение кривой экзоэмиссии, снятой в динамике реверсивного скольжения, и отвечающие ей дискретные значения микротвердости и контактной разности потенциалов (рис. 26). Здесь его вывод особенно заслуживает того, чтобы быть приведенным полностью: «...реверсивное трение приводит к разупрочнению рабочих поверхностей через промежуточную и весьма скрытую стадию их предельного упрочнения и за счет повышенной степени деформации и дефектности структуры снижает работу выхода электронов и увеличивает интенсивность экзоэлектронной эмиссии».

Заканчивая рассмотрение вопроса о природе и особенностях проявления эффекта Крамера, хотелось бы обратить внимание еще на один результат, имеющий прикладное значение.

Согласно [12], экзоэмиссия с деформированных трением поверхностей металлических образцов возрастает, когда процесс фрикционного взаимодействия протекает в среде инертного масла с добавкой поверхностно-активных веществ (например, олеиновой кислоты). Причиной повышения уровня эмиссии считается увеличение плотности дислокаций за счет адсорбционного эффекта Ребиндера, вызывающего пластифицирование поверхностного слоя и локализацию в нем сдвиговых деформаций. Фактор реверсивности трения усиливает проявление этого эффекта, поэтому при использовании поверхностно-активной смазки, эффективной с точки зрения ее противозносного действия, отношение интенсивности экзоэмиссии при реверсе к интенсивности при одностороннем трении  $I_p/I_0$  приближается к единице. Как показали эксперименты<sup>1</sup>, такой же закономерности подчиняют-

ся отношения плотностей дислокаций  $n_p/n_0$ , внутренних напряжений  $\sigma_p/\sigma_0$  и величин износа  $Q_p/Q_0$ . На этом основании условие  $I_p/I_0 \rightarrow 1$  рекомендовано в качестве ориентира при подборе к смазкам присадок, устраняющих отрицательные последствия реверса.

С эмиссией электронов низкой энергии, наблюдаемых в эффекте Крамера, не следует смешивать эмиссию высокоэнергетических электронов [4]. Такая эмиссия проявляется себя в высоком вакууме, когда происходит разрыв адгезионного шва и в зазоре между обкладками условного конденсатора возникает сильное электрическое поле. Эмиссию быстрых электронов, таким образом, можно рассматривать как особую разновидность естественной автоэлектронной эмиссии, не требующей специальной стимуляции.

При трении металлов на воздухе эмиссия высокоэнергетических электронов может, по-видимому, реализоваться только при вибрационных отскоках трущегося индентора, когда, несмотря на частичную нейтрализацию зарядов обкладок двойного слоя по механизму электропроводности<sup>1</sup>, поле в зазоре, где мгновенно образуется и тут же исчезает вакуум, остается достаточно сильным. Совершенно очевидно, что возникающий в этих условиях поток электронов, головная часть которого (своеобразный стример) состоит из частиц, летящих с очень большой скоростью, вызывает ударную ионизацию воздуха, оказавшегося в зазоре между обкладками в результате вакуумного всасывания. С этого момента нейтрализация зарядов двойного электрического слоя происходит по хорошо изученному механизму газового разряда. В данном случае мы встречаемся с аналогией между разрядными явлениями, причиной которых является разрыв адгезионного шва, и электрическими процессами в межэлектродном промежутке при наложении внешнего поля.

Указанная аналогия, однако, никоим образом не оправдывает концепцию Дубинина [107] о наличии искровых электрических разрядов при трении металлов на воздухе, нашедшую, как мы увидим в дальнейшем, своих сторонников. Здесь нет необходимости останавливаться на некорректной оценке Дубининым величины напряжения между обкладками двойного слоя, достигающей, по его подсчетам, неправдоподобно больших значений, достаточных для протекания (между металлами!) разрядов в искровой форме. Подчеркнем лишь то исключительно важное обстоятельство, которое не было принято во внимание, что и явилось, как мы полагаем, источником всех недоразумений.

Скорость и продолжительность перехода возмущенной системы в равновесное состояние определяется временем релаксации  $\tau$ :

$$v_D(t) = v_D(0) e^{-t/\tau}, \quad (2.15)$$

<sup>1</sup> Такая нейтрализация (утечка по закону Ома) может быть сильно затруднена присутствием окисных пленок.

<sup>1</sup> См. гл. VI работы [12].



где  $v_D(0)$  — средняя или дрейфовая скорость электронов проводимости, соответствующая исходному неравновесному распределению. Согласно ориентировочным расчетам Киттеля [53],  $\tau \sim 10^{-14}$  с, что подтверждается исследованием затухания коротких электромагнитных волн, распространяющихся в медном волноводе ( $\tau < 10^{-11}$  с). Период же фазы прилипания в stick-slip-процессе составляет примерно  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  с. Как видим, перераспределение зарядов при трении металлов происходит настолько быстро, что о появлении азначительной разности потенциалов в результате сохранения зарядов на отдельных выступах шероховатостей, как это представлял Дубинин и его последователи, не может быть и речи. Обо всем этом автор писал ранее [25, 108]; точно такое же критическое замечание было высказано Бобровским [109] несколькими годами позже.

Мы совсем не исключаем возможности электрической микроэрозии трущихся окисляемых поверхностей, но только видим ее причину в так называемых тихих разрядах. Кроме того, при объяснении механизма образования полей, характеризующихся «пробивными» напряженностями, могут быть иногда использованы еще и другие теоретические предпосылки (см. гл. V, § 1).

К изложенному выше остается добавить, что наиболее интенсивной эмиссией при напряженных режимах скольжения является термоэлектронная. Она характеризуется, как известно, плотностью тока насыщения, вычисляемой по формуле Ричардсона—Дешмана:

$$j_n = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}, \quad (2.16)$$

где  $A$  — эмиссионная константа.

Нестабильность термоэлектронной эмиссии при трении, вызываемая изменением числа и распределения фактических пятен контакта, где локализованы температурные всплески, проявляется себя при регистрации переменной составляющей интегральной э. д. с. фрикционной системы. К вопросу об источниках э. д. с., наиболее значимых в интересующем нас макроскопическом аспекте явлений, мы и переходим.

### § 3. Основные источники э. д. с. и эквивалентные электрические схемы фрикционных систем

Довольно широко известен тот факт, что вследствие интенсивного нагрева трущихся металлических образцов зона их непосредственного контакта может рассматриваться как горячий спай естественной термопары. Запись электродвижущей силы, генерируемой в подобном термоэлементе (рис. 27), позволяет получить информацию о средней температуре на поверхностях

трения и о поведении деформируемых контактных площадок при относительном скольжении металлов. Разработаны специальные методики тарирования естественных термопар; в некоторых из них предусматривается устранение паразитных термоэлектрических токов в замкнутых измерительных контурах.

Электрический параметр, таким образом, выступает в качестве чувствительного индикатора, и уже а priori было ясно, что через посредство электрических явлений можно определять не только интенсивность нагревания трущихся металлов в зоне их касания [108]. С другой стороны, помимо вспомогательной роли термоэлектрических явлений огромный интерес вызывало и продолжает вызывать их собственное, самостоятельное влияние на процесс трения (резания).

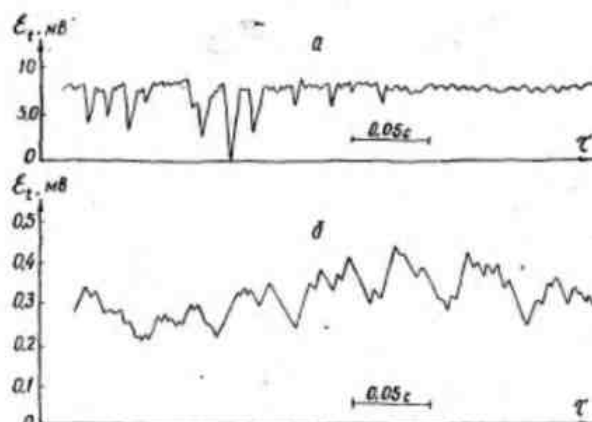


Рис. 27. Осциллограммы термо-э.д.с. фрикционных пар: а — латунь—медь; б — высокоуглеродистая сталь—высокоуглеродистая сталь.

Итак, первая компонента интегральной э. д. с. — ее термоэлектрическая составляющая.

Как было показано автором [14, 26], макроскопическое изучение электрических явлений при трении становится более систематизированным, если прибегнуть к синтезу схем нелинейных электрических цепей с переменными параметрами, отвечающих любому из элементарных актов фрикционного взаимодействия.

Пусть четыре выступа шероховатостей, принадлежащих физико-химически чистым поверхностям, находятся попарно в состоянии непосредственного металлического контакта при относительном скольжении твердых тел. Внутренний термоэлектри-

ческий контур, образующийся в этом случае, показан на рис. 28. При трении весьма вероятен случай, когда температуры в обеих зонах истинного контакта неодинаковы ( $t_1 \neq t_2$ ), и в замкнутой электрической цепи, составленной из проводников I и II ( $r_1$  и  $r_2$  — сопротивления областей сжатия), будет действовать термоэлектродвижущая сила  $e_t$ .

Согласно квантовой теории у нас нет оснований ожидать по-

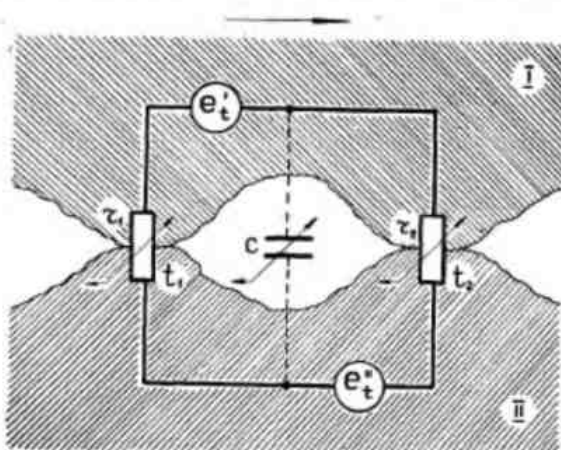


Рис. 28. Элементарная контактная ячейка и схема ее термоэлектрической цепи при трении металлов

явления сколь угодно значительной по величине термо-э. д. с. в случае ювелирных поверхностей, поскольку очень мал или совсем отсутствует «вклад» каждого из источников, которые ее вызывают, а именно [110]:

- а) разность контактных разностей потенциалов на «микроспаях», равная разности термоэлектронных работ выхода;
- б) температурная зависимость кинетической энергии (подвижности) носителей заряда;
- в) различие концентраций свободных электронов.

Но если контактирующие металлы окислены, то, учитывая полупроводниковые свойства оксидных пленок, следует иметь в виду их способность играть роль своеобразных усилителей термоэлектрических эффектов в местах наибольшего сближения конденсированных фаз. В этом случае к анализу термоэлектрических явлений при трении применима классическая статистика Больцмана. Низкая теплопроводность окислов (высокие гра-

диенты температур на контактных площадках) обуславливает появление при трении довольно значительных токов вихревого характера, которые в свою очередь могут способствовать локализованному выделению тепла [111].

Электродвижущие силы, создаваемые разностью температур в обеих ветвях контура, могут действовать как встречно (одни и тот же механизм проводимости у металлов I и II), так и согласно (цепь составлена из электронного и дырочного проводников). Поэтому общая термо-э. д. с. контура

$$e_t = e'_t \mp e''_t \quad (2.17)$$

В схему на рис. 28 включена нелинейная параметрическая емкость  $C$ . Ее величина зависит от расстояния между трущимися поверхностями и диэлектрической проницаемости среды, запол-

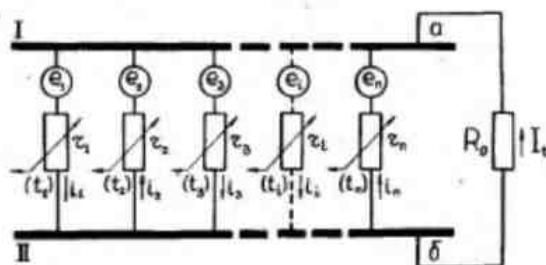


Рис. 29. Внутренние и внешние термоэлектрические цепи пары трения

няющей межфазное щелевое пространство. Дифференциальная емкость и «одновитковая» индуктивность контура характеризуют состояние электромагнитного поля фрикционного конденсатора.

Через реальный контакт протекает целая совокупность петлеобразных термоэлектрических токов  $i_1, i_2, \dots, i_n$  (рис. 29). На поверхностях поликристаллических металлов могут протекать также местные микротокки вследствие разности работ выхода у кристаллических граней.

Лебедев [112] обратил внимание на то обстоятельство, что, говоря о реальном контакте твердых тел при трении, необходимо учитывать его важную особенность, на которую указал Френкель [113] и которая должна найти отражение в эквивалентных схемах. Дело в том, что электрический ток может протекать как через участки поверхностей, сближенные до межатомных расстояний порядка нескольких ангстрем, так и удаленные друг от друга на расстояния до 30 Å. Если источниками э. д. с. считать только первые участки, то во внутренней цепи контакта

должны быть показаны нагрузочные сопротивления, соответствующие туннельной проводимости (на вторых участках). В схемах на рис. 28 и 29 эти сопротивления не выделены лишь по той причине, что мы рассматриваем область скольжения не только как термоэлектрический, но и как термоэлектронный преобразователь, т. е. в том числе и как специальный термоэлектрический преобразователь с газовым элементом [26]. Другими словами, в термоэлектрической составляющей интегральной э. д. с. учитывается и ее термоэлектронная компонента. Больше того, здесь уместно было бы говорить о роли смешанной электронной эмиссии, памятуя о том, что одни и те же участки поверхности могут служить источниками термоэлектронов, экзотронов, автоэлектронов и пр.

Общее сопротивление дискретного контакта

$$R_m = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}, \quad (2.18)$$

где  $r_i$  ( $i=1; 2; \dots; n$ ) — сопротивление одной из областей стягивания. Горячий спай естественной термопары представляет собой несколько термодпар, включенных параллельно. Если внешняя цепь пары трения замкнута на переходное сопротивление  $R_0$  и  $e_i$  ( $i=1; 2; \dots; n$ ) — электродвижущая сила внешнего контура  $r_i - R_0$ , то мгновенное усредненное значение результирующей термо-э. д. с.

$$\bar{e}_t = \sum_{i=1}^n e_i g_i / \sum_{i=1}^n g_i, \quad (2.19)$$

где  $g_i$  ( $i=1; 2; \dots; n$ ) — проводимость  $i$ -й области стягивания. Суммарный термоток

$$I_t = \bar{e}_t (R_m + R_0). \quad (2.20)$$

Если полагать абсолютные коэффициенты Зеебека  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  постоянными, что справедливо далеко не всегда, то в зависимости от типа проводимости материалов удельная термо-э. д. с. пары

$$\alpha = \alpha_1 \pm \alpha_2 \quad (2.21)$$

$$(\bar{e}_t = \alpha \Delta T).$$

Общезвестно, что проводимость  $n$ -типа обусловлена валентными электронами, которые в возбужденном состоянии могут свободно переходить на незанятые энергетические уровни, расположенные несколько выше уровня Ферми. В то же время металлы с почти заполненной валентной зоной обладают проводимостью  $p$ -типа, т. е. основными носителями заряда в них являются вакантные энергетические уровни в распределении Ферми («дырки»). Чисто дырочный механизм проводимости наблюда-

Таблица 4

Химическая элементная группа, содержащаяся в сплаве	Валентность	Преобладающий тип собственной проводимости	Металл сплав и элементный состав (%)						Чуждые сплавы			
			п-18	п18Ф2	ЗМГСА	9460	ВНС-2	ВНС-3	Х18Н7	ЭН700	ОТ4-1	РТ5
C	2, 4	диэлектрик	<0,7-0,8	<0,85-0,95	0,28-0,35	0,36-0,43	<0,08	0,11-0,14	<0,12	0,06-0,12	<0,1	<0,05
Al	3	n	<0,4	<0,4	0,9-1,2	<0,1	<0,7	<0,7	<0,8	<0,5	1,0-2,5	4,0-5,5
Si	4	полупроводник	<0,4	<0,4	0,9-1,2	<0,1	<0,7	<0,7	<0,8	<0,15	<0,15	<0,15
Ti	2, 3, 4	n	1,0-1,4	1,8-2,4			0,1-0,3			основа	основа	основа
V	5	n	3,8-4,4	3,8-4,4	0,8-1,1	14,1-15,5	14,1-15,5	14,1-15,5	17,0-20,0	20,0-23,0	0,8-2,0	
Cr	3, 6	p	<0,4	<0,4	0,8-1,1	0,5-0,8	<1,0	<1,0	<2,0	<0,7		
Mn	2, 3, 4, 6, 7	n	основа	основа	основа	основа	основа	основа	основа	основа		
Fe	2, 3	n	<0,4	<0,4	<0,4	2,5-3,0	4,5-5,0	4,0-5,0	4,0-5,0	35,0-40,0	<0,4	<0,3
Ni	2	n	<0,4	<0,4	<0,4	0,8-1,2						
Cu	1, 2	n	<0,3	<0,5		1,75-2,50	2,3-2,8					
Mo	6	p	17,5-19,0									
W	6	p										

Предполагаемый тип проводимости сплава  
Тип проводимости, определенный экспериментально

стес у вольфрама, молибдена, цинка и некоторых других металлов. Что касается механизма проводимости сплавов, то он, очевидно, определяется процентным содержанием и типом собственной проводимости химических элементов, входящих в их состав. Как правило, сплавы имеют смешанный характер проводимости, однако в каждом из них преобладает *n*- или *p*-тип (табл. 4), что легко определяется по знаку и величине термо-э. д. с. при различных сочетаниях материалов (автор использовал, например, близость к нулю значения  $\alpha_{\text{Fe}}$ ).

Весьма интересным является вопрос о действии еще одного источника э. д. с., роль которого, как правило, не учитывается при определении температуры поверхностных слоев методом естественной термомпары. Речь идет о так называемом акустоэлектрическом эффекте, т. е. о появлении э. д. с. вследствие увлечения носителей электрических зарядов волнами механических напряжений. В квантовой теории, как известно, этим волнам сопоставляются фононы.

Впервые рассматривая этот вопрос применительно к трению и обработке твердых материалов, Лебедев [112] исходит из того положения, что деформируемые участки трущихся поверхностей являются источниками упругих и пластических волн [114]. Качественный анализ задачи он проводит на примере распространения от границы раздела плоских волн без учета явлений отражения и интерференции. Воспользовавшись феноменологической формулой Вайнрайха [115] для напряженности акустоэлектрического поля

$$E = \rho \alpha_n I / \gamma v \quad (2.22)$$

и считая, что интенсивность плоских волн убывает в направлении их распространения по закону

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (2.23)$$

автор получает следующее выражение для разности потенциалов между точками с координатами  $x_1$  и  $x_2$ :

$$U_{12} = \frac{\rho \alpha_n}{\gamma v} \cdot I(x_1) [1 - e^{-\alpha(x_2-x_1)}]. \quad (2.24)$$

Здесь  $\mu$  — подвижность носителей заряда;  $\alpha_n$  — коэффициент затухания волн при взаимодействии с носителями заряда;  $\gamma$  — электропроводность материала;  $v$  — скорость волн;  $\alpha$  — коэффициент затухания волн в материале.

Поскольку при трении возникают колебания и волны различных частот, то разности потенциалов, определенные для всех составляющих спектра с учетом изменений акустоэлектрических свойств материала, должны быть, конечно, алгебраически просуммированы. Аналогичный подход предлагается использовать и при расчете разности потенциалов между сопряженными телами, т. е. фактически акусто-э. д. с.  $\mathcal{E}_a$ .

Ясно, что интенсивность волн напряжений, а следовательно, и величина  $\mathcal{E}_a$  зависят от тех факторов, которые определяют характер и содержание процессов фрикционного взаимодействия. От этих же факторов зависят и частоты механических волн звукового диапазона, что следует из результатов гармонического анализа спектра колебаний силы трения [116].

Рассмотрим теперь акт взаимодействия металлов в присутствии электропроводной смазочной жидкости. Участие электролита в качестве целевой капиллярной прослойки приводит к образованию скачков потенциала на границах металл — раствор (рис. 30). Как правило, величины  ${}_{\text{I}}\varphi_{\text{III}}$ ,  ${}_{\text{II}}\varphi_{\text{III}}$  таковы, что их ал-

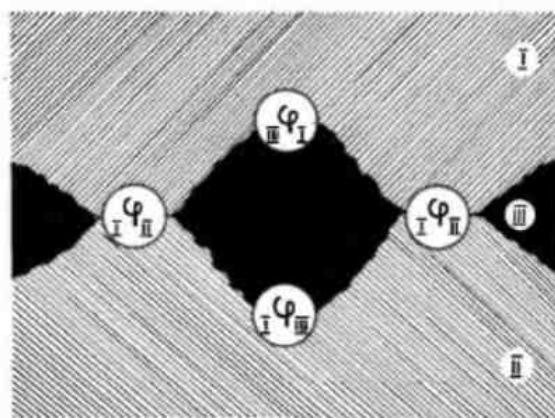


Рис. 30. Замкнутый участок системы металл (I) — электролит (III) — металл (II)

гебраическая сумма не равнопротивоположна контактной разности потенциалов  ${}_{\text{I}}\varphi_{\text{II}}$ . Другими словами, мы имеем короткозамкнутый гальванический микроэлемент, что создает потенциальную возможность для протекания на его электродах окислительно-восстановительных реакций. Электродвижущая сила элемента

$$e_z = {}_{\text{I}}\varphi_{\text{III}} - {}_{\text{II}}\varphi_{\text{III}} - {}_{\text{I}}\varphi_{\text{II}} \quad (2.25)$$

При относительном скольжении поверхностей наряду с гальвано-э. д. с. будут действовать и термоэлектродвижущие силы (рис. 31), оказывающие, по-видимому, влияние на скорость электродных реакций, межфазовое (поверхностное) натяжение и т. д.

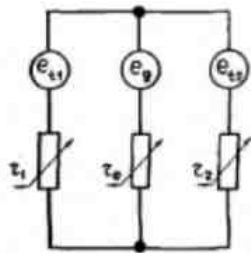


Рис. 31. Эквивалентная электрическая схема контактной ячейки при относительном скользянии металлических поверхностей в присутствии электролита

Автор в свое время подчеркивал, [14], что в схеме на рис. 31 не показаны электрические емкости, которые имеют поверхности раздела между компонентами фрикционной пары и раствором электролита (емкости двойных слоев), их сопротивления утечки, емкость между двумя электродами. Все это было учтено Мельниченко [15] при разработке уточненной эквивалентной схемы фрикционного контакта применительно к случаю трения в условиях избирательного переноса (см. § 7 этой главы).

При одинаковом электрохимическом поведении металлов по всей поверхности и полном отсутствии контактирующих островков э. д. с. гальваноземента

$$\mathcal{E}_g = \mathcal{E}^0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{a_2^{1/n_2}}{a_1^{1/n_1}}, \quad (2.26)$$

где  $\mathcal{E}^0 = \mathcal{E}_2^0 - \mathcal{E}_1^0$  — э. д. с. элемента при активности ионов  $a_1 = a_2 = 1$ ;  $n_1, n_2$  — заряды ионов.

Усредненная величина  $\mathcal{E}_g$  определяется как разность электродных потенциалов с учетом неоднородности электродных процессов на смежных участках поверхностей. О значениях этой величины можно судить по данным табл. 5.

Таблица 5

Разность потенциалов между образцами, помещенными в различные среды, мВ

Среда	Материал образцов		Сопротивление внешней цепи, кОм
	сталь—медь	сталь—сталь	
Чистое парафино-нафтенное минеральное масло (совершенно свободно от полярных компонентов)	0	0	0,1
Дистиллированная вода	1,2	0,3	0,1
3%-ый раствор натривой соли моносульфатного эфира серной кислоты $\text{Na}[\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_2)_9\text{SO}_3]$	11	5	0,1
3%-ый раствор хлористого натрия	238	21	5

Случаю одновременного действия гальвано-э. д. с.  $\mathcal{E}_g$  и термо-э. д. с.  $\mathcal{E}_{t2}$ , когда появление термоэлемента означает переход

гальваноземента в режим короткого замыкания, отвечает эквивалентная схема трехфазной фрикционной системы в виде рис. 32. Здесь  $R_e$  — сопротивление электролита; емкость  $C$  отражает способность трущихся поверхностей накапливать электрические заряды, когда в полости фрикционного конденсатора присутствует третья фаза. Электродвижущая сила  $\mathcal{E}_f$  (разность потенциалов  $\varphi_a - \varphi_e$  при  $R_0 = \infty$ ) является своего рода интегральным параметром, характеризующим те условия, в которых протекает процесс трения (резания). Ее регистрация с помощью безынерционной аппаратуры ( $У$  — усилитель,  $О$  — осциллограф) позволяет, в частности, получить информацию о состоянии тонких смазочных пленок на контактных площадках (см. гл. III и гл. IV).

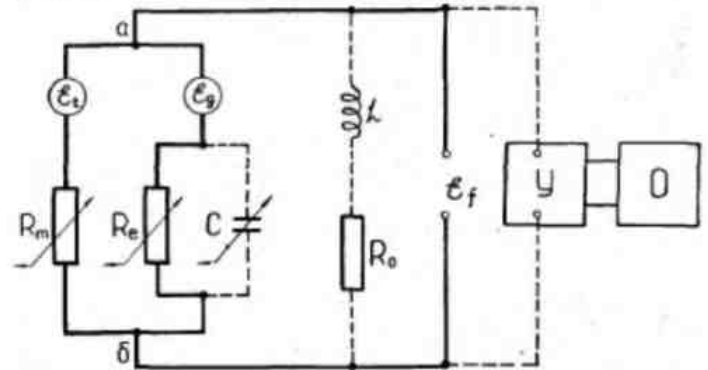


Рис. 32. Принципиальная электрическая схема трехфазной фрикционной системы

Кроме упомянутых источников э. д. с., особая роль при трении может принадлежать своеобразному униполярному генератору, в который превращается фрикционная пара, если по крайней мере один из ее элементов окажется в намагниченном состоянии. Причиной естественного намагничивания тел могут быть: магнитные поля окружающих ферромагнетиков, появившиеся из-за насыщения механизмов и машин электрооборудованием; поля, сцепленные с замкнутыми термоэлектрическими контурами; упругомагнитный эффект (см. гл. VII, § 4); гиромангнитный эффект (при очень быстром вращении); магнитное поле Земли и т. д.

Отличительным признаком э. д. с. электромагнитной индукции  $\mathcal{E}_i$ , в данном случае по сравнению с  $\mathcal{E}_t$ ,  $\mathcal{E}_a$  и  $\mathcal{E}_g$ , является, во-первых, то, что сам факт ее существования не зависит от наличия непосредственного контакта тел или присутствия сма-

зочной фазы, и, во-вторых, то, что наводится она в массе одного из трущихся тел, движущегося по отношению к намагниченному контртелу — источнику неоднородного поля. Поэтому в схеме на рис. 32 источник  $\mathcal{E}_1$  нельзя подключать параллельно источникам  $\mathcal{E}_t$  и  $\mathcal{E}_a$ , тогда как с источником  $\mathcal{E}_a$ , например, так поступать можно.

Не уточняя здесь некоторых деталей, что сделать ниже значительно проще, мы обращаемся к важнейшей характеристике фрикционного контакта — его электрическому сопротивлению.

#### § 4. Электрическая проводимость контакта

Конечное значение электропроводности металлов обусловлено тепловыми колебаниями решетки и несовершенством ее структуры, например наличием вакансий и примесей. При уменьшении расстояния между атомами силы борновского отталкивания частиц возрастают значительно быстрее, чем силы притяжения. Поэтому внешнее давление несущественно изменяет электрические свойства твердых тел, если при сжатии, разумеется, не происходит полиморфного перехода. Согласно Хольму [117], контактная поверхность, воспринимающая усилие, лишь частично является проводящей. Ток течет главным образом через так называемые  $\alpha$ -пятна, появление которых связано с разрывом экранирующих пленок оксидов либо с туннелированием очень тонких адсорбционных и пассивирующих пленок, благодаря чему обеспечивается квазиметаллический контакт. Вследствие малости  $\alpha$ -пятен происходит искривление линий тока, препятствующее свободному переносу заряда на границе раздела фаз (рис. 33). Такое искривление приводит к появлению в электрической цепи дополнительного сопротивления, называемого сопротивлением области стягивания. Для разрыва окисных пленок необходимо, чтобы контактное давление в местах их повреждения достигло предела текучести. Поэтому измерения электрической проводимости контакта дают возможность получить информацию о смене характера деформирования металлов с упругого на пластический, что легко показать на примере разрушения прочной пленки оксида<sup>1</sup>, покрывающей мягкий алюминий (рис. 34). Еще больший интерес к измерениям электропроводности границы раздела вызван тем, что

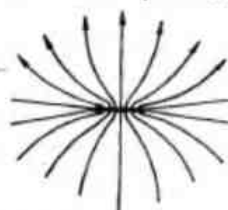


Рис. 33. Упрощенная модель стягивания линий тока в области проводящего  $\alpha$ -пятна (по Р. Хольму)

разрушению электропроводности границы раздела вызван тем, что

<sup>1</sup> Данные о твердости оксидов и критической нагрузке, при которой начинается разрушение окисных пленок на электролитически анодированных поверхностях, можно найти в работе [118].

величина последней, характерная в общем случае физически неоднородное состояние контакта, становится в результате этого мерой его истинной площади [119]. Адсорбционные или хемосорбированные слои атомов кислорода остаются на чистой металлической поверхности даже при тщательном ее обезгаживании. С образованием проводящих  $\alpha$ -пятен, однако, ток через них протекает почти так же, как если бы он протекал между различными кристаллитами в компактном металле. Вот почему регистрация величины результирующего сопротивления стягивания позволяет проследить за установлением металлического контакта поверхностей и найти числовую оценку для его фактической площади.

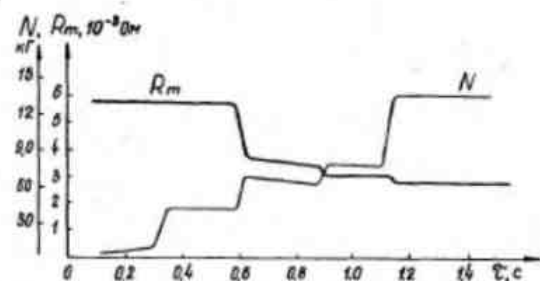


Рис. 34. Запись сопротивления контакта и нормальной нагрузки при сжатии алюминиевых образцов

Электропроводность контакта исследовалась на специальной машине трения, которая была изготовлена по эскизному проекту автора в Кавендишской лаборатории. На двухъярусном сварном каркасе расположены (рис. 35 и 36): составной шпиндель с закрепленным диском трения, рычажное нагрузочное устройство, фототахометр, ртутный контакт и приводной электродвигатель, передающий вращение на вал шпинделя с помощью ременной передачи. Плавный разгон и регулирование скорости вращающегося элемента узла трения обеспечивала система генератор — двигатель. Смазочно-охлаждающая жидкость подавалась из резервуара по трубкам, закрепленным в станине нагрузочного устройства. Для предохранения от ее разбрызгивания при скольжении применялось застекленное ограждение со сливным краником. Трущиеся образцы, вал-токопровод и электрические зажимы были надежно изолированы от массы. Приложение нормальной нагрузки  $N$  к образцам осуществлялось посредством маховичка. Если поворачивать винт, на котором расположены гайки с правой и левой резьбой, то салазки, несущие вертикальные рычаги и жестко связанные с гайками, будут двигаться навстречу друг другу. Образцы, закрепленные в нижних

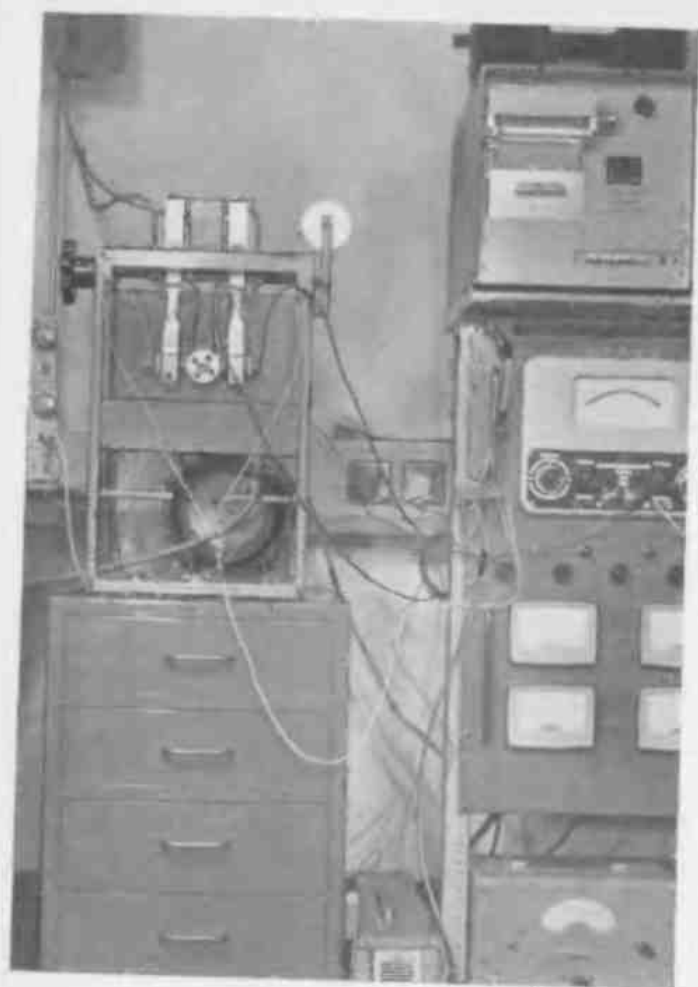


Рис. 35. Общий вид установки трения

плечах рычагов, коснется поверхности диска трения практически одновременно, причем как раз в тот момент, когда шарики, утопленные в верхних плечах, подойдут вплотную к торцам распорного цилиндра. Последний может свободно перемещаться в горизонтальном направлении, вследствие чего номинальные давления, действующие на обеих контактных площадках, окажутся уравновешенными, если дисковый образец неподвижен. При скольжении моменты сил трения относительно осей поворота рычагов частично нарушают симметрию нагружения. Степень асимметрии сил трения и нормальных нагрузок определялась как расчетным путем, так и с помощью контрольных измерений. Информация о поведении нормальной нагрузки могла поступать на вход измерительного моста от любого из тензодатчиков, рас-

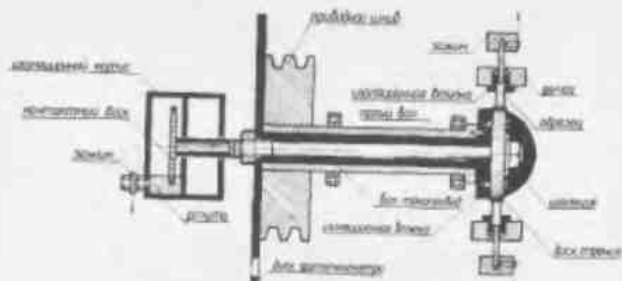


Рис. 36. Схематическое изображение узла трения

положенных в выемках на ослабленных участках нижних плеч рычагов.

Сначала (в первой серии опытов) двусторонний контакт создавался между неподвижными образцами — одним дисковым и двумя цилиндрическими (радиус цилиндрического образца составляет 4 мм, толщина и радиус диска равны соответственно 10 мм и 25 мм). Для подготовки поверхностей — удаления окисных пленок и обезжиривания — применялись абразивная шкурка 0000 и ацетон<sup>1</sup>. Чтобы оценить номинальные размеры каждой из контактных площадок, можно ориентировочно принять, что их длина соответствует диаметру цилиндрического образца, а ширина — диаметру единичного пятна, который рассчитывается по формулам Герца (упругий контакт) и Треска (пластический контакт).

<sup>1</sup> Механическое полирование высокодисперсным абразивом и растворение квазимолекулярной части адсорбированных слоев обеспечивали достаточную воспроизводимость исходных физико-химических свойств и состояния трущихся поверхностей.

Принципиальная электрическая схема опытов по определению электропроводности контакта приведена на рис. 37, где  $R_1$  — входное регулируемое сопротивление,  $R_2$  — сопротивление настройки,  $R_r$  — сопротивление катушки гальванометра,  $R_m$  — сопротивление контакта<sup>1</sup>. Поскольку контакт закорачивал вход самого чувствительного гальванометрического самописца, прибор реагировал на малейшее расхождение образцов. Элементарный расчет схемы приводит к следующему выражению для проводимости контакта:

$$G = \frac{U}{I_r R_r (R_2 + R_r)}, \quad \text{где } I_r \text{ — ток, протекающий через гальванометр, } U \text{ — напряжение на зажимах источника.}$$

Экспериментально были получены кривые  $G=f(N)$  для четырех пар металлов: медь — медь (рис. 38, а), молибден — медь

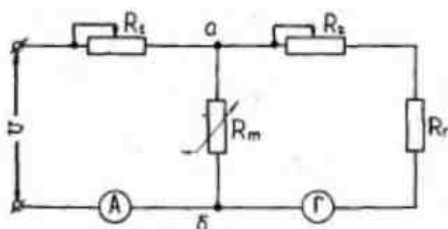


Рис. 37. К измерению электрической проводимости контакта (принципиальная схема опыта)

(рис. 38, б), сталь — медь (рис. 38, в) и константан — медь (рис. 38, г). Покажем, что на участках поверхности, воспринимающей усилие, имеет место действительный металлический (или квазиметаллический) контакт. Если  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — удельные электропроводности металлов, находящихся в контакте, то удельная контактная проводимость  $\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ . Сравнивая для двух произвольных пар отношение  $\frac{G'}{G''}$  проводимостей, полученных из опыта, с отношением их удельных электропроводностей  $\frac{\lambda'}{\lambda''} = \frac{\lambda_1' \lambda_2'}{\lambda_1'' \lambda_2''} \cdot \frac{\lambda_1'' + \lambda_2''}{\lambda_1' + \lambda_2'}$ , отмечаем (табл. 6), что

<sup>1</sup> Здесь и в дальнейшем автор опускает термин «двусторонний». Цилиндрические образцы находились в физически равнозначных условиях, поэтому характер изменения функции  $R_m=f(N)$  не зависит от того, что измерилось — суммарное сопротивление  $R_m$  или сопротивление одной из контактных зон  $R_m/2$ . Последовательное соединение двух поверхностей раздела приводит к мультипликации подлежащего изучению эффекта.

эти величины совпадают (в пределах погрешностей). Это и является свидетельством того, что через данную поверхность раздела ток протекает без заметного переходного сопротивления, как между различными кристаллитами в компактном металле [13].

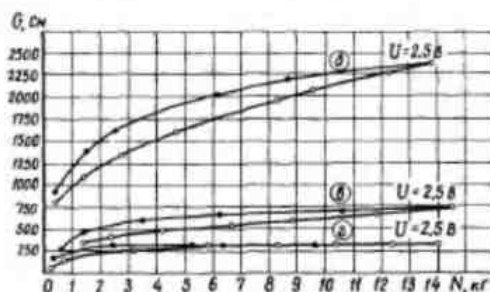
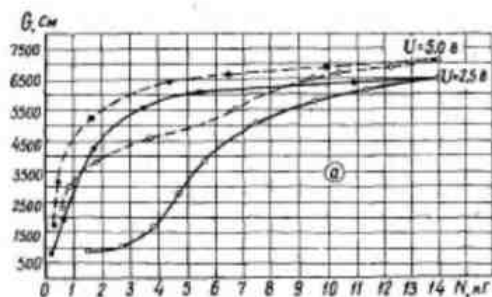


Рис. 38. Зависимость электрической проводимости контакта от нормальной нагрузки

Таблица 6

Индекс	Пары					
	медь—медь	медь—медь	медь—медь	сталь—медь	молибден—медь	молибден—медь
	медь—медь	сталь—медь	молибден—медь	константан—медь	сталь—медь	константан—медь
$G'/G''$	12,8	7,3	2,1	1,7	3,5	6,2
$\lambda'/\lambda''$	14,8	7,6	2,2	1,9	3,5	6,2



Ориентировочные расчеты показывают, что полное разрушение окисных пленок, прежде всего пленок потускнения на меди, происходило при нагрузке в 6 кг.

Причиной образования металлических пятен может быть не только разрыв пленок на контакте, но и фреттинг<sup>1</sup>. Поэтому естественно, что с повышением напряжения проводимость контакта значительно улучшается (рис. 38).

Известно [119, 46, 120], что зависимость между электропроводностью и нагрузкой имеет вид  $G = \kappa N^x$ , где  $\kappa$  — коэффициент, зависящий от механических характеристик материалов, их удельной проводимости и от геометрии выступов на контактных поверхностях. Если следовать Боудену и Тейбору [119], то по значению показателя степени  $x$  можно судить о состоянии контакта:  $x$  является величиной постоянной, равной  $1/3$  в случае упругого и  $1/2$  в случае пластического контакта. По мнению Крагельского [46], однако,  $x$  является функцией нагрузки и, как правило, уменьшается с увеличением  $N$ .

Методика определения  $x$  и  $\kappa$ , принятая автором совместно с Яшиной [13], состоит в следующем:

1) полагая  $x$  постоянным и равным  $x'$ , находим его величину для двух произвольно выбранных точек:

$$G_1 = \kappa' N_1^{x'} \quad \text{и} \quad G_2 = \kappa' N_2^{x'}$$

2) считаем, что соответствующее значение  $\kappa' = \text{const}$  во всем диапазоне изменения нагрузки, и строим график функции  $x' = \Psi(N)$ ;

3) выделяем интервал, где  $x'$ , а следовательно, и  $x$  оказываются действительно постоянными; определяем величину  $x$  для этого интервала и истинное значение коэффициента  $\kappa$ ;

4) находим  $x$  для всех остальных точек.

Графики функции  $x = \Phi(N)$  для рассматриваемых пар металлов приведены на рис. 39. Как видим, показатель степени, характеризующий зависимость между проводимостью и давлением, остается постоянным для некоторого интервала нагрузок. Нестабильность  $x$  при малых нагрузках обусловлена наличием пленок на контактных площадках. Уменьшение  $x$  при больших нагрузках объясняется тем, что с увеличением фактической площади контакта его проводимость как бы насыщается и

$$\frac{dG}{dN} = \kappa N^{x-1} \left( x + N \ln N \cdot \frac{dx}{dN} \right) = 0.$$

Отсюда  $x = -N \ln N \frac{dx}{dN}$  или, после интегрирования,

$$x = \text{const} \cdot \frac{1}{\ln N}. \quad (2.27)$$

Таким образом,  $\Delta x < 0$  при  $\Delta N > 0$  в рассматриваемой области.

В заключение укажем на гистерезис кривых проводимости (рис. 38). Если с возрастанием давления электропроводность контакта увеличивалась сравнительно быстро, то при плавном сбросе нагрузки она уменьшалась значительно медленнее, так что реверсивные точки не ложились на первоначальные кривые. Это явление, по всей вероятности, вызвано адгезией поверхностей и последующим упрочнением адгезионного шва. По отно-

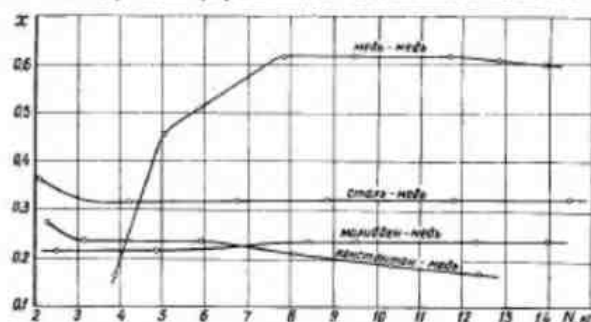


Рис. 39. Зависимость фактора  $x$  от нормальной нагрузки

шению площади петли  $S_1$  к площади  $S_2$ , ограниченной первоначальной кривой (табл. 7), можно судить о склонности металлов к сцеплению.

Очевидно, что проявление адгезии и возможность образования когезионного шва зависят от пластичности материалов и чистоты сопряженных поверхностей.

Таблица 7

Пара	Медь—медь	Сталь—медь	Молибден—медь	Константан—медь
$S_1/S_2$ ( $N=6-14$ кг)	0,154	0,073	0,051	0

Когда исследовалась проводимость контакта загрязненных поверхностей, несущих на себе граничные смазочные слои высокомолекулярных жирных кислот, наблюдалось далеко не монотонное поведение функции  $G=f(N)$  при разгрузке пар (рис. 40). Причина на первый взгляд парадоксального «вспучивания» кривых остается до сих пор не совсем ясной, хотя и уме-

<sup>1</sup> Согласно [117], под истинным фреттингом понимается процесс разрушения связей в диэлектрике с образованием токопроводящего канала внутри пленки.

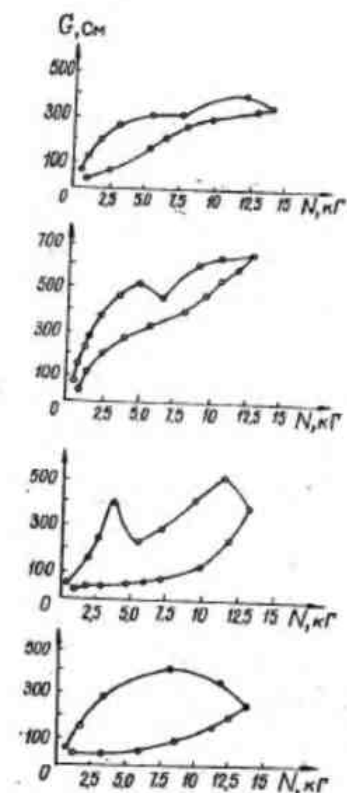


Рис. 40. Гистерезис критических проводимости контакта без предварительной очистки поверхностей при циклическом изменении нагрузки

понижением усилия сжатия, тогда как отклонение образца в противоположную сторону приводило к увеличению давления на диск.

В задачу настоящей работы не входит анализ причин, вызывающих механические релаксационные колебания в системах

<sup>1</sup> Такие специфические условия, конечно, не типичны для работы трущихся сопряжений в узлах механизмов и машин, а соответствуют скорее началу их катастрофического износа. Этим они и интересны.

ство предположить, что она кроется в адлотронической перестройке структуры слоя загрязнений (см. гл. III, § 2).

Во второй серии опытов регистрировался характер изменения контактной проводимости в процессе трения образцов при таких извращенных режимах скольжения, которые приближались к условиям схода стружки по контактным поверхностям инструмента<sup>1</sup>. Сопротивление  $R_2$  (см. схему на рис. 37) выбиралось таким образом, чтобы ток, протекающий через катушку гальванометра, не превышал своего допустимого значения в случае полного расхождения трущихся поверхностей. Практически это означает, что чувствительный гальванометр был настроен как раз на фиксацию возможных нарушений, а равно и последующих восстановлений фактического контакта металлов.

Записи  $R_m$  показали, что основной причиной значительных ослаблений контакта вплоть до его разрыва являются вибрации. Цилиндрические образцы вибрировали как в поперечном по отношению к вектору  $v$  направлении (упругие колебания рычажной системы), так и в продольном (скольжение со скачками). Одна фаза каждого колебания сопровождалась

понижением усилия сжатия, тогда как отклонение образца в противоположную сторону приводило к увеличению давления на диск.

В задачу настоящей работы не входит анализ причин, вызывающих механические релаксационные колебания в системах

<sup>1</sup> Такие специфические условия, конечно, не типичны для работы трущихся сопряжений в узлах механизмов и машин, а соответствуют скорее началу их катастрофического износа. Этим они и интересны.

трения. Поэтому мы ограничимся лишь отдельными замечаниями по поводу особенностей скачкообразного движения трущихся тел.

Автор полностью разделяет ту точку зрения [121], что изменение механических параметров системы (например, увеличение

50Гц

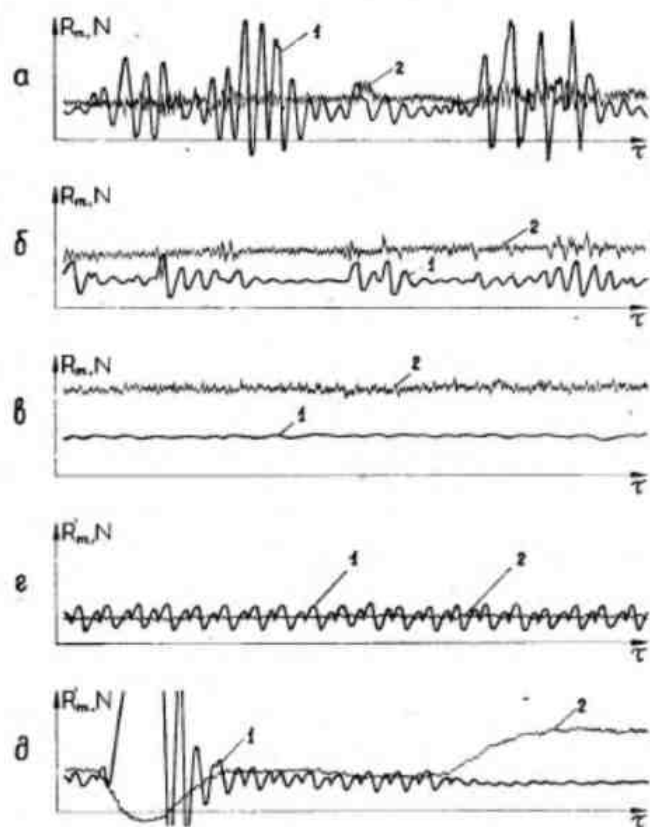


Рис. 41. Записи электрического сопротивления контакта и нормальной нагрузки при трении, отражающие влияние смазки на характер фрикционных колебаний

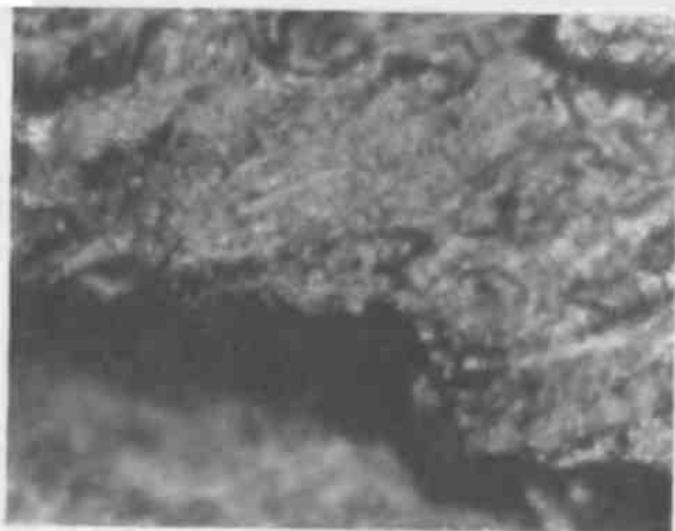


Рис. 42. Коррозийный нарост цинка на поверхности константана.  $\times 200$

жесткости) не может полностью устранить релаксационные колебания элементов фрикционных пар. Одной из основных причин появления заметных вибраций является падающий характер кривой  $F(v)$  на отдельных ее участках<sup>1</sup>. С целью аргументации этого положения, выдвинутого Кайдановским и Хайкинсом [122], укажем на следующий экспериментальный факт. Если микровиброметр, с помощью которого осуществлялось нагружение, оставался в некоторой промежуточной позиции, то по мере износа образцов сопротивление скольжению значительно уменьшалось, а скорость износа, освобождающегося от «объятий» цилиндрических образцов, соответственно возрастала. Подобные условия при трении оказываются весьма подходящими для самовозбуждения и развития высокочастотных колебаний легкого индикатора.

Рассмотрим записи электрического сопротивления контакта (1) и нормальной нагрузки (2), представленные на рис. 41. Прежде всего следует отметить, что при некоторых значениях  $N$  удалось зарегистрировать своеобразные пучности колебаний, чередующиеся с участками, на которых амплитуда вибраций убы-

вала в несколько раз (рис. 41, а). Такие разрывные колебания связаны, вероятно, с часто повторяющимися срывами наростов, возникающих на поверхности ползуна. Перенос меди на сталь и константан, например, протекал настолько интенсивно, что обычная стадия поверхностного намазывания металла переходила в стадию формирования инородного твердого тела (рис. 42). Кроме того, причиной резко выраженных релаксационных колебаний может быть срез (или скалывание) единичных выступов шероховатости, выделяющихся своими размерами (рис. 43). С увеличением нагрузки вибрации ослабевают (рис. 41, б) и наконец исчезают почти полностью (рис. 41, в). Кстати, записи  $N$ , полученные с таким чувствительным входным звеном, как датчик сопротивления, являются сами по себе превосходным источником информации о разрывных поперечных колебаниях. Если быстродействие канала записи не ограничивается инерцией гальванометра, то по кривым изменения нагрузки можно оценить даже период продольных релаксационных колебаний, зависящий от времени заедания в stick-slip-процессе [25]. Устойчивая пленка смазки, внесенной произвольно, коренным образом изменяет характер колебаний при трении: она гасит высокочастотную вибрацию цилиндрических образцов, в то время как низкочастотные колебания становятся более регулярными (рис. 41, г). Если искусственно сбросить нагрузку, а затем плавно ее поднимать, то нетрудно найти такое значение  $N$ , при котором эти колебания проявляются особенно отчетливо (рис. 41, д). Автором сравнивались записи, отвечающие состоянию резонанса фрикционной системы и выходу из этого состояния при наличии и отсутствии смазки [25]. Результаты сравнения позволили предположить, что смазочная среда как бы смещает спектр с основной частотой колебаний таким образом, чтобы и при относительно высоких скоростях скольжения механические параметры системы в целом определялись параметрами узла дисковый образец — шпиндель. Граничный смазочный слой выступает в роли своеобразного полугармонического анализатора, который выделяет из внешнего воздействия на индикатор собственные периодические колебания массивного элемента.

Автор отнюдь не исключает, что при малых, а иногда даже средних нагрузках возникала экспериментальная ситуация, благоприятная для гидродинамики и полужидкостного трения. Это тем более убеждает нас в правильности вывода Толстого и Кайлана [123]: «...при сухом или чисто граничном трении скольжения, как и при гранично-гидродинамическом, свобода нормальных перемещений ползуна является обязательным условием как падающей скоростной характеристики силы трения, так и фрикционных автоколебаний».

Величина  $R_m$  зависит от температуры областей ступивания в процессе скольжения, кристаллографического соответствия и чистоты сопряженных поверхностей. Мы уже отмечали, что

<sup>1</sup> По элементарной теории трения кривая  $F(v)$  в целом имеет сложный характер (см. гл. 1, § 4).



Рис. 43. Затвердевший микрокристалл на дисковом образце из меди после трения по константиту с графитом.  $\times 500$

тонкие адсорбционные и пассивирующие пленки легко пропускают ток благодаря туннельному эффекту. Конечно, но сравнительно малым переходным сопротивлением обладает мономолекулярный слой органической смазки, находящейся в граничном состоянии. Индивидуализированные пленки окислов являются полупроводниками с большим удельным сопротивлением и поэтому в обычных условиях играют роль изоляторов. При трении, однако, полупроводниковые ингредиенты могут заметно влиять на электропроводность контакта, нагревание которого

вызывает резкое увеличение концентрации и кинетической энергии свободных зарядов в полупроводниках. Существенно также, что при напряженных режимах скольжения сохранение, а тем более формирование нового индивидуализированного окисла часто оказывается невозможным и, несмотря на быструю регенерацию окислов на обнаженных контактных площадках, чему

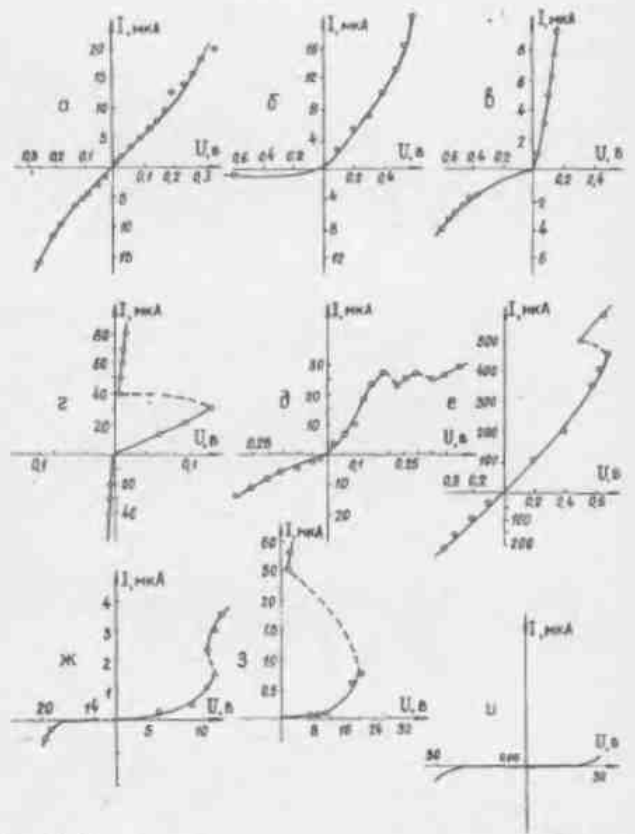


Рис. 44. Вольт-амперные характеристики окисных пленок, образовавшихся на поверхности силовых после часовой выдержки в муфель при различных температурах (спиты В. С. Башковой и Н. П. Бобровой): а, б, ж —  $\text{ZnO}$  ( $150^\circ\text{C}$ ); з —  $\text{ZnO}$  ( $160^\circ\text{C}$ ); г —  $\text{PbO}$  ( $300^\circ\text{C}$ ); е — сталь 20 ( $600^\circ\text{C}$ ); ж —  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $300^\circ\text{C}$ ); з —  $\text{SiO}_2$  ( $1000^\circ\text{C}$ )

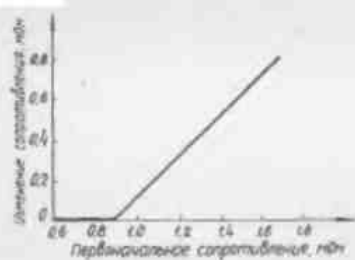


Рис. 45. Влияние импульсов электрического тока силой в 156 А на сопротивление контакта образцов, изготовленных из чистого золота (по Ф. П. Бондону и Д. Б. П. Уильямсону)

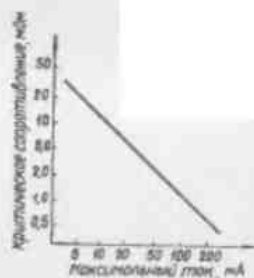


Рис. 46. Соотношение между сопротивлением сужения и допустимым для него максимумом электрического тока в логарифмических координатах [126]

способствуют вибрации трущихся тел, окисные пленки могут быть самыми разными по толщине, структуре, химическому составу и пр. Если учесть данные рис. 44 и принять во внимание, что удельные сопротивления полупроводников варьируют от  $10^{-5}$  до  $10^{10}$  Ом·см, а удельные сопротивления диэлектриков — в интервале  $10^{10}$ — $10^{25}$  Ом·см [124], то на основании всего вышесказанного диапазон изменения  $R_{\text{сж}}$  можно считать неограниченным (0,  $\infty$ ). Но чаще всего, если только контакт действительно существует, его сопротивление не превышает сотых и даже тысячных долей ома. Оно тем меньше, чем больше размеры проводящих пятен на поверхностях, воспринимающих усилие.

Соображения, развитые в этом параграфе, непосредственно связаны с важной реологической особенностью контакта — изменением величины сопротивления стигмания при протекании через поверхность раздела сравнительно сильного электрического тока.

Оказалось [125, 126], что для любой данной силы тока существует определенная критическая величина стигмания. До тех пор, пока фактическая площадь контакта обуславливает сопротивление стигмания, не превышающее его критического значения  $R_{\text{кр}}$ , ток не повлияет на состояние перманентного металлического контакта. Но как только сопротивление стигмания будет больше  $R_{\text{кр}}$ , металл в области контактных площадок начнет размякаться. Благодаря интенсивному тепловыделению в непосредственной близости к поверхности раздела произойдет физико-механическая осадка образцов, а сопротивление стигмания уменьшится до величины  $R_{\text{кр}}$  за счет роста проводящих пятен (рис. 45). Критическая величина сопротивления стигмания изменяется обратно пропорционально максимальному току,

проходящему через контакт (рис. 46); она не зависит от длительности или формы токовых импульсов при сжатии чистых металлических поверхностей. Итак,

$$R_{\text{кр}} \cdot I_{\text{max}} = C, \quad (2.28)$$

где  $C$  — постоянная, равная предельно возможному падению напряжения на сопротивлении стигмания и зависящая от материала элементов гомогенной пары. Темп осадки образцов определяется скоростью разогрева контактных зон и характером изменения среднего давления текучести у металлов. Особенно заметный рост площади фактического контакта наблюдается в том случае, когда через поверхность раздела протекает ток большой силы, который плавит коммутационные переключки практически мгновенно (рис. 47). Если контакт обесточить, металл охлаждается и вновь затвердевает, однако размеры расплавленных пятен продолжают оставаться теми же самыми.

Описанная выше установка, естественно, давала автору возможность проследить за влиянием электрического тока на проводящие контактные мостики (рис. 48, а и б). Известно, однако,

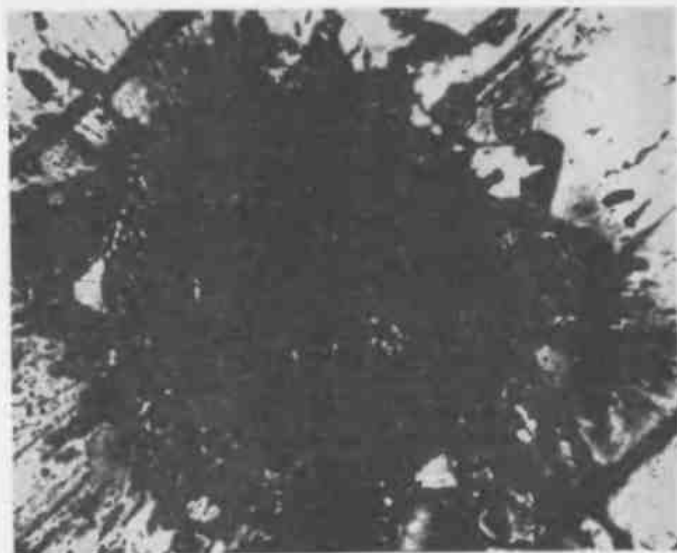


Рис. 47. Микрофотография поверхности золота, показывающая разрушение в районе контакта, вызванное пропуском сильного тока при нагрузке 10Г.  $\times 120$  [126]

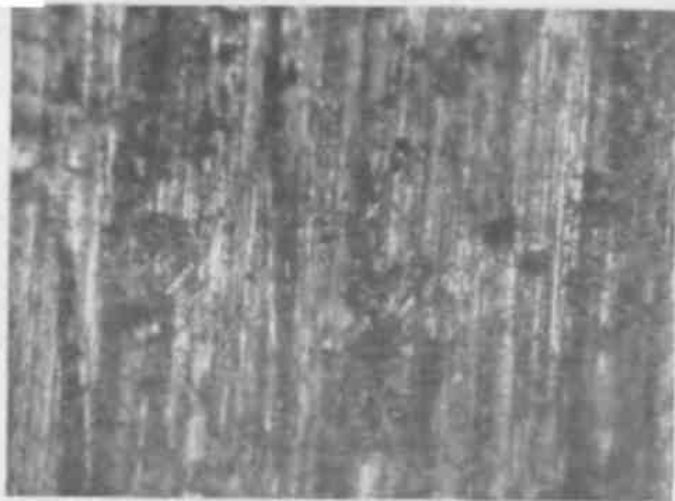
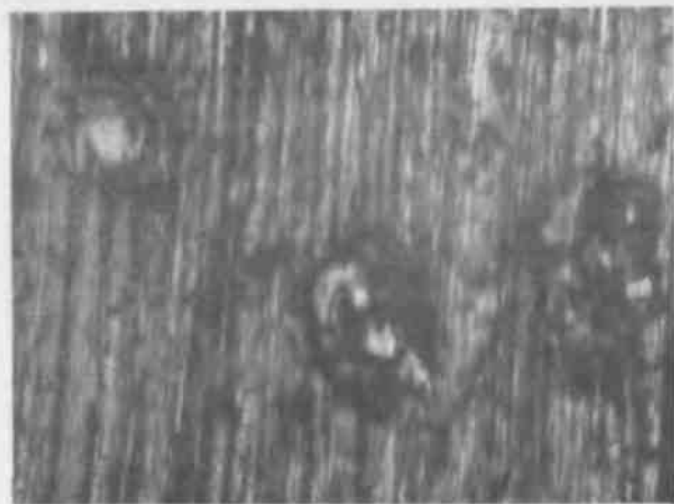


Рис. 48. Микрофотография поверхности алюминия (после пропускания постоянного тока через охлажденные контактные плиты)

что эффекты, связанные с протеканием естественных электрических микротоков через поверхность раздела трущихся тел, выражены, как правило, слабо,—они имеют накопительный характер. Стало быть, результаты, получаемые при использовании постороннего источника, который обеспечивает длительное протекание через контакт тока желаемой силы, нельзя экстраполировать на такой, например, источник, как естественная фрикционная термопара, без дополнительного обоснования самой возможности специфично высоких значений силы термоэлектрического тока при трении (резании). Этим мы и займемся в ходе дальнейшего изложения.

#### § 5. Особенности термоэлектрических явлений при трении

Параллельно с нормальной нагрузкой и скоростью скольжения на ультрафиолетовом гальванометрическом самописце измерительного блока установки (рис. 35) регистрировалась разность потенциалов, возникающая между элементами трущихся пар. В случае недостаточной чувствительности гальванометра измерительный сигнал усиливался. Использовались металлы и сплавы,



того же тока силой в 5 А (слева) и 10 А (справа), иллюстрирующие влияние нагрузки (2500 Г).  $\times 200$

отличающиеся по своим физико-механическим свойствам: алюминий, медь, молибден, константан, углеродистые и легированные стали [25]. Если пренебречь падением напряжения внутри источника, то указанную разность потенциалов можно трактовать как интегральную электродвижущую силу фракционной системы. Из вышесказанного очевидно, что интегральная э. д. с.  $\mathcal{E}_i$  обусловлена как термоэлектрическими и термоэлектронными явлениями на поверхности раздела металлов, так и акустоэлектрическим эффектом, эффектом Крамера и, возможно, другими причинами. Однако увлечение носителей зарядов волнами механических напряжений, а также низкотемпературная электронная эмиссия, возникающая с поверхности твердых тел в результате их деформации, структурных превращений, адсорбционно-окислительных и других физико-химических процессов (см. § 2), рассматривались в данном случае как эффекты второго порядка. Стало быть, считалось, что  $\mathcal{E}_i \approx \mathcal{E}_t$  [26]<sup>1</sup>, и, как было видно из записей, магнитное поле Земли, магнитное поле двигателя и паразитная термо-э. д. с. в точках коммутации 1, 2, 3 (рис. 49) не оказывали заметного влияния на характер изменения  $\mathcal{E}_i$ .

<sup>1</sup> К тому же автор упрощенно прибегает и в дальнейшем, где это не может отразиться на результатах качественного анализа.

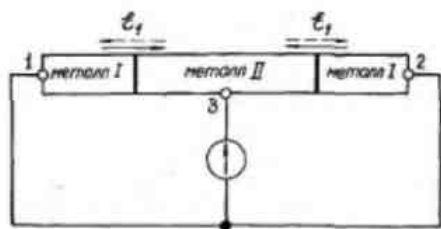


Рис. 49. Схема измерения электродвижущей силы

При напряженных режимах скольжения, близких к условиям схода стружки по контактным поверхностям инструмента, усредненная термо-э. д. с.  $\bar{\epsilon}_t$  составляет 0,15–15 мВ. Она существенно изменяется по величине в зависимости от скорости скольжения (рис. 50, а) и проявляет тенденцию к пропорциональному росту с увеличением нормальной нагрузки (рис. 50, б). В случае разгрузки образцов кривая  $\bar{\epsilon}_t = f(\tau)$  оказывается значительно сдвинутой во времени по отношению к  $N = \varphi(\tau)$  (рис. 50, в), что, как предполагает автор, является прямым следствием адгезивно-ногезионного гистерезиса (см. заштрихованный участок).

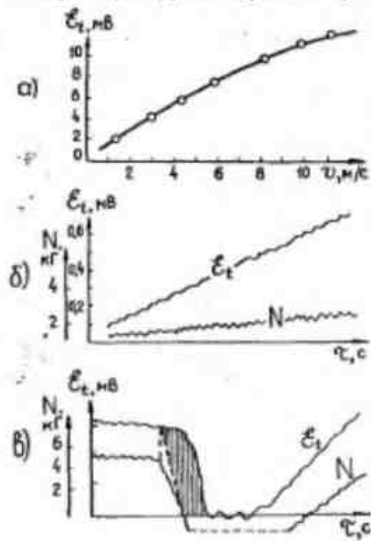


Рис. 50. Записи усредненной термо-э. д. с. при трении металлов

На рис. 51, а представлены записи э. д. с. и нормальной нагрузки при трении образцов из чистой углеродистой стали<sup>1</sup> и медного диска (сталь — медь — сталь). Легко видеть, что при каждом из последующих нагружений friction pair's maximum value of  $\bar{\epsilon}_t(\bar{\epsilon}_t)$  decreases. As the temperature of the rubbing bodies increases, the magnitude of  $\bar{\epsilon}_t$  changes within wide limits up to a change in its sign (polarity of the source). Inversion of the thermoelectric force [127].

На рис. 51, а представлены записи э. д. с. и нормальной нагрузки при трении образцов из чистой углеродистой стали<sup>1</sup> и медного диска (сталь — медь — сталь). Легко видеть, что при каждом из последующих нагружений friction pair's maximum value of  $\bar{\epsilon}_t(\bar{\epsilon}_t)$  decreases. As the temperature of the rubbing bodies increases, the magnitude of  $\bar{\epsilon}_t$  changes within wide limits up to a change in its sign (polarity of the source). Inversion of the thermoelectric force [127].

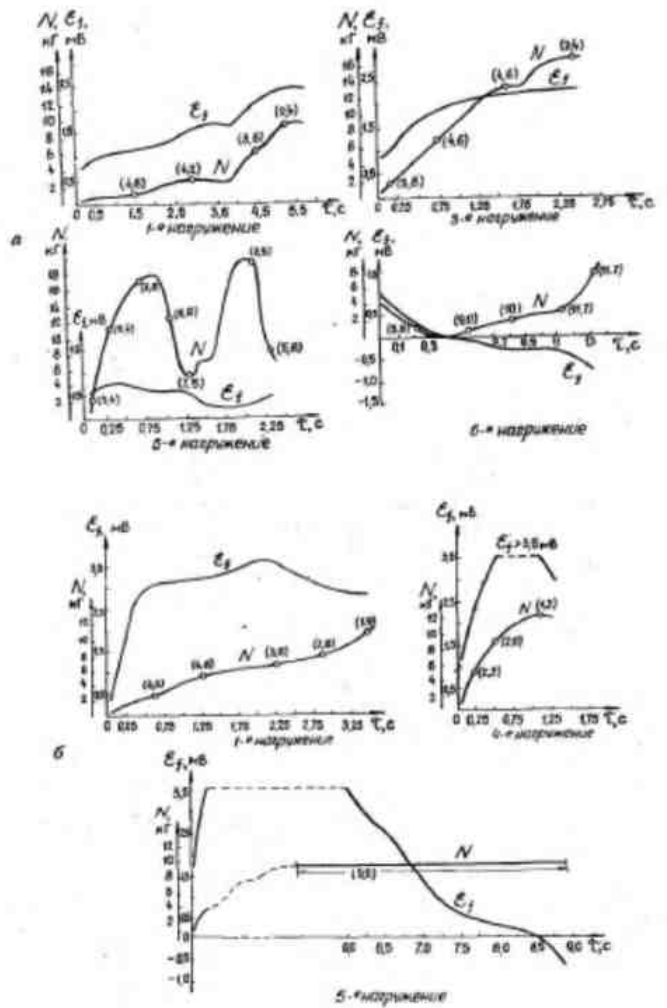


Рис. 51. Характер изменения электродвижущей силы при повторных нагружениях friction pair (в скобках указана скорость относительного скольжения образцов, м/с)

<sup>1</sup> British Standard 970:1955, Specification En8.



Рис. 52. Микрофотографии поверхностей стали (вверху) и меди (внизу) после нескольких циклов нагружения.  $\times 200$

Поскольку выбранные режимы скольжения были очень напряженными, то можно предположить, что тонкие пленки окислов на контактных площадках разрушались практически мгновенно [118]. Если считать, что окисные пленки частично сохраняются на трущихся поверхностях, то их влияние на термоэлектрические характеристики материалов не всегда бывает существенным [128]. Перемена полярности термоэлемента, зарегистрированная при шестом нагружении, обусловлена, по-видимому, влиянием диффузионного окисления на термоэлектрические свойства металлов.

Первоначальный знак  $\varepsilon$ , д. с. определяется теми местами, которые занимают медь и сталь в термоэлектрическом ряду (сталь положительна по отношению к меди). Интенсивный нагрев стальных образцов (коэффициент трения  $\mu \sim 0,8-0,4$ ) активизирует диффузионный процесс. Выступы шероховатостей у сталь-

ных поверхностей бороздят разнородную медь (рис. 52), оплавление которой затрудняет доступ кислорода в зону трения. Поэтому наиболее интенсивное диффузионное окисление стали происходит в тот момент, когда образцы отходят от диска при сбрасывании нагрузки. Диффузия кислорода в сталь вызывает значительное изменение коэффициента Зеебека (вплоть до изменения его знака).

Величина  $\mathcal{E}_1$  зависит также от температурных градиентов в дисковом и цилиндрическом образцах. Их различие приводит к неодинаковой скорости распространения заряда через поверхность соприкосновения металлов и к аккумуляции его на одном из тел [129]. Аккумуляция положительного заряда на цилиндрическом образце и отрицательного — на дисковом уменьшает значение  $\mathcal{E}_1$  при скольжении по схеме *сталь — медь — сталь* и увеличивает его при обратной схеме (*медь — сталь — медь*).

Знаки  $\varepsilon$ , д. с. и нормальной нагрузки при трении медных образцов в стального диска показаны на рис. 51, б.

Свободный доступ кислорода к поверхности стали создает благоприятные условия для диффузионного окисления металла при больших нагрузках. Коэффициент Зеебека падает с повышением температуры поверхностных слоев стали, и если процесс скольжения осуществляется длительно, то наблюдается инверсия термоэлектродвижущей силы.

В связи с изложенным в работе [127] обращается внимание на следующее. Инверсия термо- $\varepsilon$ , д. с. была зафиксирована при таких режимах скольжения, которые по своей напряженности приближались к условиям процесса резания. Поэтому по показаниям естественной термопары, протарированной обычным методом, нельзя судить о температуре в зоне резания, если в коммуницирующей полости между инструментом и деталью (стружкой) попадет окислитель. Изменение термоэлектрических характеристик может происходить в результате не только поверхностного [130], но и диффузионного окисления металлов, когда их температура приближается к температуре плавления. Кстати, тантал, титан, ниобий и некоторые другие материалы являются прекрасными геттерами.

Сопротивление  $R_0$  (рис. 29) определяется тем состоянием, в котором в данный момент находится внешняя цепь пары трения. Оно может быть одного порядка с сопротивлением контакта  $R_{\text{кон}}$ , а во многих случаях, в частности при резании металлов, превосходить его во много раз [109]. Произвольно полагая, что  $R_0 \approx R_{\text{кон}}$ , автор счел возможным допустить [108], что значения термотока в несколько ампер, полученные Ансером и Опитцем экспериментальным путем (при резании металлов) [131, 23], являются реальными. Действительно, если  $R_0 \approx R_{\text{кон}} = 10^{-2} \div 10$  Ом и  $\mathcal{E}_1 = 0,2 \div 20$  мВ, то  $I_t = 10^{-3} \div 10$  А. В связи с тем, однако, что вопрос о мощности источника термо- $\varepsilon$ , д. с. оставался открытым, в работах [108, 132, 26, 29 и др.] неизменно подчеркивалась не-



обходимость считаться с динамикой термоэлектрических процессов в зоне трения и вытекающей из нее вероятностью протекания сравнительно сильных, но импульсных токов. В этом и усматривалась специфика нагрузки фрикционного источника термо-э. д. с., отличающая его от источников, применяемых для модельных испытаний того влияния, которое оказывает электрический ток на заедание трущихся тел и интенсивность изнашивания [133, 134]. Такие модели (с внешними, посторонними источниками) являются скорее аналогами скользящих электрических контактов, от токовой нагрузки которых зависит перенос материала в парах трения электрических машин и устройств [135].

На основе соотношений, полученных в работе [117], была предпринята попытка оценить повышение температуры  $\Delta\theta$  контактных поверхностей, вызванное канализацией термоэлектрического тока через области стягивания<sup>1</sup>. Учитывая повышение температуры  $t$  образцов вследствие их совместного поверхностного деформирования при трении, имеем [25]:

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{8} \cdot \frac{U^2}{\rho k (1 + \alpha t)}, \quad (2.29)$$

где  $U$  — напряжение на контакте, равное  $\mathcal{E}_t - I_t R_c$ ;  $\rho$  — удельное сопротивление;  $k$  — теплопроводность;  $\alpha$  — температурный коэффициент.

Ниже приведены результаты ориентировочного расчета применительно к обработке сталей резанием. За компоненту с плохой электрической проводимостью был принят титано-вольфрамо-кобальтовый сплав Т15К6.

$U$ , мВ	5	10	15	20	25
$\Delta\theta$ °С	0,05	0,2	0,45	0,8	1,25

Казалось бы, термоэлектрические токи, протекающие через поверхность раздела, не имеют никакого отношения к актам сцепления фаз. В то же время правильность этого вывода ставилась под сомнение рядом соображений и фактов.

В период притирания поверхностей с ортогональным расположением шероховатостей на зажимах милливольтметра, подключенного к образцам, удалось зафиксировать кратковременные «перенапряжения» до 70 мВ и выше [136]. Чтобы зарегистрировать температурные всплески при трении, Боуден и Ридлер [137] осциллографировали усредненную термо-э. д. с. и показали, что ее мгновенные значения для пары константан — сталь достигают 45—50 мВ. Электродвижущая сила у отдельных контактов с одним контактным пятном могла быть в этом случае

еще больше. Если  $e_t \approx 60$  мВ, то  $\Delta\theta_t$  — местное повышение температуры константана за счет тепла Джоуля—Ленца могло составлять примерно 35—40°С, когда  $U \rightarrow \mathcal{E}_t$ .

Высокоомный вход  $R_c$  измерительного прибора, подключенного к фрикционному источнику, резко снижает величину тока в горячем слое. Реакции окисления на трущихся поверхностях могут замедлиться, что в конечном счете приводит к ослаблению термоэлектрических эффектов — падению  $\mathcal{E}_t$  [130]. Кроме того, следует иметь в виду, что для передачи максимальной мощности от термонары в нагрузку сопротивления внутренней и внешней цепей должны быть одинаковыми. При  $R_c \gg R_m$  к. п. д. термоэлектрического преобразователя очень далек от своего наибольшего значения.

Вопрос о возможном пике термоэлектродвижущей силы  $e_t$  в импульсе, равно как и вопрос о том, какова величина кратковременных бросков тока  $i_t$ , влияющих на мощность источника, оставался до конца не выясненным. Самым важным аргументом, однако, который наводил на мысль о причастности термоэлектрических токов к адгезионным явлениям, была, пусть даже и очень слабо выраженная, тенденция к увеличению силы трения при закорачивании фрикционного источника. Автор не мог согласиться с мнением братьев Гордиенко [21], предположивших, что термоэлектрический ток, возникающий при трении металлических тел, так же, как и ток, поступающий от внешнего источника, оказывает на трущиеся поверхности эрозионное, разрушающее действие, по природе аналогичное тому, которое имеет место при электронной обработке металлов (см. гл. V, § 1). С другой стороны, нельзя было не считаться с предпосылками, которые позволяли рассматривать термотоки в качестве фактора, помогающего объединению кристаллических решеток при трении. Поэтому с учетом динамики процессов, поскольку тепло Пельтье является линейной, а тепло Джоуля — квадратичной функцией тока, отмечалась возможность дополнительно узлолокализованного нагревания металла током при растягивании коммутирующих переключателей благодаря обратной трансформации электрической энергии в тепловую. Согласно [26], например, порция джоулева тепла может быть «последней каплей», необходимой для преодоления энергетического порога схватывания, под которым с самого начала мы понимали определенную величину энергии активации, необходимую для обобществления валентных электронов при квантовомеханическом взаимодействии тел на границе раздела между решетками. Исчезновение указанной границы приводит к диффузионному спеканию материалов, причем перенос диффузанта осуществляется не только за счет градиента температуры, но и под влиянием силового электрического поля. Особое внимание обращалось автором на то обстоятельство, что фрикционная пара как весьма динамичная совокупность точечных микросплавов со сложной сис-

<sup>1</sup> Здесь автор рассматривал только проявление тепла Джоуля—Ленца, несомненно игнорируя, как вскоре им было установлено, охлаждение контактных пятен за счет эффекта Пельтье.

темой петель уравнильных термотоков вихревого характера может оказаться в наиболее благоприятных условиях, когда механизм проводимости у сопряженных элементов будет одним и тем же. Данное обстоятельство приобретает еще большую значимость при обработке металлов резанием. Нельзя, например, забывать о существовании внутренней термоэлектрической цепи: *передняя грань инструмента* ( $\sim 1200^\circ\text{C}$ ) — *стружка* — *деталь* — *задняя грань инструмента* ( $\sim 900^\circ\text{C}$ ). Если эта цепь суть комбинация электронного и дырочного проводников, то через фазовые поверхности раздела может протекать сильный ток.

С весьма близкими взглядами, но в то же время с тезисом об очень сильно выраженном, можно сказать гипертрофированном, тепловом действии термотоков мы встречаемся в сообщении [138]: «На основании аналитических расчетов и экспериментальных данных было установлено, что при прохождении круговых термотоков через область стягивания в результате выделения джоулевого тепла температура нагрева этих областей может достигать температур плавления, а при динамических нагрузках и относительных перемещениях контактирующих поверхностей — даже кипения. Значительное повышение температур в областях стягивания за счет выделения джоулевого тепла круговыми (нетлевыми) термотоками приводит к развитию процессов схватывания и других тепловых процессов, которые способствуют интенсивному разрушению контактирующих поверхностей».

Изложенная здесь точка зрения автора была подвергнута корректировке, в которой роль джоулевого тепла, оказавшегося действительно очень существенным фактором, регулирующим колебания температуры в зоне контакта, интерпретируется несколько иначе. С этой интерпретацией читатель может познакомиться в параграфе 2 главы V. Единое физическое содержание термоэлектрических явлений при трении и резании предполагает и общность теоретических, методических и экспериментальных аспектов их изучения.

## § 6. Роль электрохимических процессов

Как отмечалось выше, трехфазную фрикционную систему с ионо-содержащей смазочной прослойкой можно смоделировать в виде короткозамкнутого гальванического элемента. Опираясь на эту модель, автор высказал ряд априорных соображений, касающихся роли электрохимических процессов при трении и резании металлов. Указывалось, в частности [111], что независимое (раздельное) или совместное (параллельное) действие термо- и гальвано-э. д. с. изменяет градиент электрических и электромагнитных флуктуационных полей на границе раздела фаз, а следовательно, не может не влиять на специфику физической

адсорбции и кинетику химических реакций (в том числе реакций образования мылов), на механизм подвижности и адаптации молекул смазки при формировании граничного слоя. Тем более оправданной признавалась тенденция учитывать такие параметры компонент, входящих в состав смазочных веществ, как электрический момент полярных молекул [32], величина статического заряда ионов жидкости и металла [139], размер ионов [140], проникающая способность среды [17] и т. п. С целью управления механизмом трибоэлектрических явлений подчеркивалась перспективность исследований по разработке таких методов, как, например, пропускание слабых токов через поверхность раздела от постороннего источника, искусственное изменение электродных потенциалов находящихся в сопряжении металлов, предварительная ионизация частиц смазки, вводимых в зону контакта.

Согласно [30]<sup>1</sup>, при работе фрикционной пары возникает автоматически действующий электрохимический механизм управления износом, который зависит от таких факторов, как электродвижущая сила гальванического элемента, сдвиг потенциалов при его замыкании, поляризуемость электрохимической цепи, скорость электродных процессов и т. д. Отсюда следует, что добавка в смазку окислителя или восстановителя, активатора или ингибитора должна приводить либо к условиям, когда вновь образовавшееся смазочное вещество — продукт электродных реакций — будет вести себя как разрушающая агрессивная среда, либо, наоборот, к ситуации, благоприятной для пассивирования ювенильных поверхностей с образованием прочных защитных покрытий. Как показали стойкостные испытания образцов из стали 45 в коррозионно-активных средах [141], для образования пластичных экранирующих пленок, снижающих поверхностную энергию, необходима щелочная среда, в то время как пленки вторичных структур, появившиеся в кислой среде, не предотвращают коррозионное разрушение поверхности и препятствуют выходу на нее дислокаций.

Влияние поляризации на коэффициент трения и поверхностное повреждение инертных металлов было обнаружено Боуденом и Янгом [142], изучавшими поведение пары платина — платина, погруженной в разбавленную серную кислоту. Платина является удобной моделью для теоретического изучения того влияния, которое оказывает состояние поверхности на процесс трения [77]. Такой моделью платина могла стать благодаря возможности воспроизводимо формировать на ней электрохимическим путем как хемосорбционные мономолекулярные слои с различной химической индивидуальностью, так и пленки фазовых окислов. По дан-

<sup>1</sup> Вводная часть этой работы повторяет содержание доклада, сделанного автором на 2-м научном семинаре по электрическим явлениям при трении и резании (Москва, ИМАШ, 17—19 декабря 1969 г.).

ным работы [143], например, на поверхности платины, находящейся в контакте с электролитом, при потенциалах (измеренных по отношению к обратимому водородному электроду в том же растворе)  $\varphi_0 \leq 0,3\text{В}$  адсорбируется атомарный водород; при  $\varphi_0 \geq 0,7\text{В}$  наблюдается адсорбция атомов кислорода, которые при более высоких потенциалах могут включаться в состав хемосорбционных поверхностных соединений, фазовых оксидов и т. д.; при  $0,3\text{В} \leq \varphi_0 \leq 0,7\text{В}$  поверхность платины практически свободна от адсорбированных газов (область двойного электрического слоя).

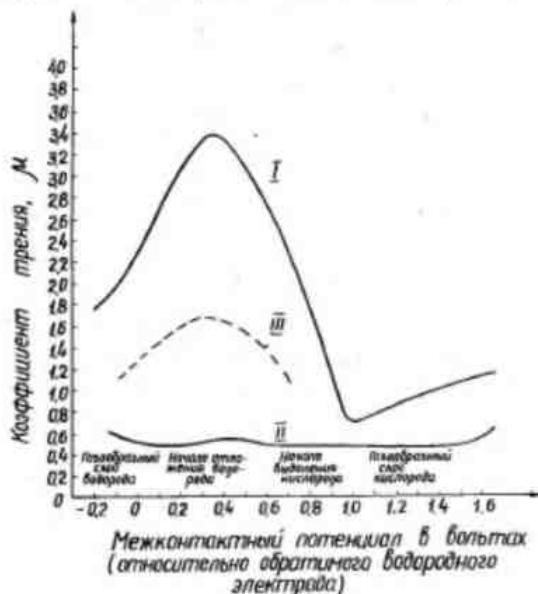


Рис. 53. Влияние межконтактного потенциала на трение платиновых поверхностей, погруженных в нормальный раствор серной кислоты [142]

Результаты, полученные Боуденом и Янгом, представлены на рис. 53. При отсутствии в растворе посторонних примесей (кривая I) коэффициент трения максимален в области двойного слоя, а появление адсорбированного водорода и кислорода приводит к его уменьшению. Однако зависимость коэффициента трения от количества выделяющегося кислорода не является монотонной; при  $\varphi_0 \approx 1,0\text{В}$  она проходит через минимум. Здесь, по-видимому, сказывается явное преобладание химической связи атомов и мо-

лекул первичного моноосла с чистой поверхностью металла над сравнительно слабым взаимодействием за счет ван-дер-ваальсовых сил.

Изменение коэффициента трения в зависимости от контактного потенциала сопровождается соответствующим изменением характера поверхностных повреждений. Если постепенно снижать потенциал от 1,0В до 0,3В, то можно наблюдать появление заметных следов износа в виде задигов.

Кривая 2 получена при трении в тех же условиях, когда раствор серной кислоты был загрязнен следами  $\text{H}_2\text{S}$ . Опыт говорит о том, что решающее влияние на силу трения оказывает не сам контактный потенциал, а именно природа экранирующих пленок с их способностью изменять работу выхода электрона из металла.

Электрокапиллярная кривая 3 построена авторами по данным Фрумкина с сотр., измерявших контактные углы между газовым пузырьком и поверхностью платины в растворе сернокислого натрия. Нетрудно видеть, что максимальное значение поверхностного натяжения между платиной и электролитом (произвольные единицы) соответствует наибольшей величине коэффициента трения. По мнению авторов, взаимосвязь трения и поверхностного натяжения объясняется тем, что в случае сосредоточения положительного заряда (или электронов) на поверхности происходит уменьшение поверхностного натяжения на границе раздела металл — электролит под действием сил электростатического отталкивания; в то же самое время взаимное отталкивание двойных электрических слоев должно уменьшать притяжение и адгезию металлических поверхностей, а стало быть, и трение. Наибольшую величину поверхностного натяжения и отвечающий ей максимум адгезии (трения) следует ожидать в точке, где поверхностный заряд сведен фактически к нулю.

Интерпретация данных, полученных Боуденом и Янгом, осложняется присутствием электролита, смазочная функция которого может зависеть от заряда поверхности. В этой связи была исследована фрикционная активность анодно-окисленной платины в воздушной среде [77].

Опыт по трению предшествовало изучение закономерностей накопления и взаимосвязи различных типов и форм оксидов на платине в зависимости от потенциала окисления, состава контактирующего с электродом раствора и температуры. Измерения, проведенные с применением двух электрохимических методов — быстрых потенциодинамических  $I, \varphi_0$ -кривых и метода моста переменного тока<sup>1</sup>, говорят в пользу предположения [145], согласно которому образующийся выше  $\sim 1,5\text{В}$  стабильный оксид является хемосорбционным соединением  $\text{Pt(IV)}$  с кислородом и компонентами электролита, входящими в состав хемосорбционного комплекса в качестве лигандов; в то же время метастабиль-

<sup>1</sup> Методика измерений описана в работе [144].

ный окисел может рассматриваться как монослой хемосорбированных атомов кислорода. Поэтому область потенциалов  $\leq 1,5\text{В}$  считалась областью существования хемосорбированных атомов кислорода, область потенциалов  $\geq 2,2\text{В}$  — областью существования монослоя хемосорбционных комплексов Pt(IV), а переходная область  $\sim 1,5 \div 2,2\text{В}$  — областью сосуществования этих форм.

Как отмечают Тюрин с сотр. [146], появление хемосорбированного поверхностного соединения начинается с образования отдельных его молекул или небольших изолированных островков, локализованных на активных участках поверхности. Рост потенциала вызывает объединение таких островков в закрывающий электрод монослой ( $\varphi_0 \sim 2,2\text{В}$ ), после чего окисел способен уплотниться путем двумерной квазикристаллизации [147].

Образование полислоев фазовых окислов происходит в ограниченной области потенциалов [148, 149]. Выяснилось, что только нижней границе области соответствует один и тот же потенциал ( $\sim 2,1\text{В}$ ) независимо от режима окисления электрода (гальваностатического или потенциостатического). Другими словами, потенциалом как бы автоматически управляется лишь процесс зарождения фазы.

Как показал анализ  $I, \varphi_0$ -кривых, отражающих низкотемпературное восстановление фазового окисла, сформированного при сравнительно высокой температуре [77], этот окисел занимает весьма малую часть поверхности, причем центрами его роста являются скорее всего дефекты плотнозакрывающего квазикристаллического окисла (или так называемого предельного окисла).

С помощью специальной установки, описание которой и методика измерений на ней приведены в работе [77], определялся коэффициент статического трения между окисленным платиновым образцом и стеклянной пластинкой. Платиновые образцы были изготовлены из проволоки диаметром 0,5 мм, один конец которой оплаивался. Для опытов отбирались лишь те образцы,

которые не имели изъянов на рабочей части поверхности. После промывания в горячих кислотах (азотной и серной) и дважды дистиллированной воде образцы высушивались в струе нагретого воздуха при температуре 60—65°C. Оптически полированная стеклянная пластинка обезжиривалась в смеси бихромата калия и концентрированной серной кислоты, затем промывалась в дважды дистиллированной воде и высушивалась на воздухе.

Результаты опытов по измерению коэффициента статического

трения приведены на рис. 54. Предварительное окисление платиновых образцов при анодных потенциалах (потенциостатический режим), соответствующих экспериментальным точкам, осуществлялось в однонормальной серной кислоте в течение двух минут при температурах 20°C (кривая 1) и 80°C (кривая 2). Несовпадение симбатных областей  $\mu, \varphi_0$ -кривых объясняется, вероятно, как тем, что они получены для разных платиновых образцов, так и влиянием температуры окисления на заполнение и плотность упаковки хемосорбированных форм.

На  $\mu, \varphi_0$ -кривой, полученной для образца, окисленного при 20°C, видны два участка постоянства  $\mu$ , располагающиеся при  $\varphi_0 \leq 1,5\text{В}$  и при  $\varphi_0 \geq 1,9\text{В}$ . Как отмечалось ранее, первый из них, по существу, соответствует области хемосорбции атомов кислорода, второй — области образования монослоя квазикристаллического поверхностного соединения Pt(IV). Переходный участок  $1,5\text{В} \leq \varphi_0 \leq 1,9\text{В}$  совпадает по потенциалам с областью постепенной замены монослоя атомов кислорода предельным окислом. Увеличение на этом участке статического трения, как можно предположить, связано с изменением конфигурации молекулярного поля поверхности платины по мере ее перехода в качественно новое состояние.

Для образца, окисленного при 80°C, на  $\mu, \varphi_0$ -кривой, кроме указанных плато и переходного участка, имеется максимум  $\mu$  в области потенциалов, соответствующих формированию фазового окисла. Авторам работы [77] представляется, что в ограниченной по потенциалам окрестности максимума физическая природа сил трения отличается значительно большей неоднородностью: присутствие на поверхности платины микроскопических выступов шероховатости в виде полислоев фазовых окислов на дефектах предельного окисла усиливает роль составляющей силы трения механического происхождения, что и отражается на величине  $\mu$ .

Таким образом, коэффициент трения является структурно-чувствительной характеристикой как по отношению к хемосорбированным двумерным слоям различных типов, так и для трехмерной фазы.

Помимо теоретического значения рассмотренные результаты могут представлять и некоторый практический интерес: платина находит все возрастающее техническое применение, в том числе в наиболее ответственных узлах трения. Однако значительно ближе к практическим задачам стоят работы по использованию поляризации с целью изменения механических и физико-химических свойств трущихся поверхностей для регулирования взаимодействия фрикционных пар в коррозионно-активных средах [150—152 и др.].

Так, например, в работе [150] показана возможность применения поляризации как метода изменения поверхностной энергии твердых тел и кинетики электрохимических процессов с целью получения износостойких поверхностных структур. Изучалось

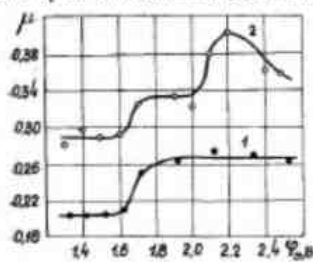


Рис. 54. Зависимость коэффициента статического трения от потенциала окисления платиновых образцов (1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2 мин) при 20°C (1) и 80°C (2)

влияние анодной и катодной поляризации в слабкокислой (рН 6,5) и щелочной (рН 11) средах<sup>1</sup> на силу трения, шероховатость и весовой износ трущихся поверхностей, на электрическую проводимость фрикционного контакта и характер развития дислокационной структуры в зоне механической активации. Табл. 8, в ча-

Таблица 8

Поляризационный эффект в щелочной среде при потенциале 1300 мВ в опытах со сферическим индентором из стали ШХ15\* (по данным работы [130])

Материал контрэлектрода	Анодная поляризация		Катодная поляризация	
	$F/F_0$	$H_{\text{ан}}/H_{\text{кат}}$	$F/F_0$	$H_{\text{ан}}/H_{\text{кат}}$
Бронза БрАЖМц	1,2	—	~1	1,26
Чугун СЧ12-26	>2	0,83	~1	0,82
Сталь 45 (НВ=240)	0,9	—	~1	0,81

\*  $F_0$ ,  $H_{\text{ан}}$  и  $F$ ,  $H_{\text{кат}}$  — соответственно начальные и конечные значения параметров (сила трения и микрошероховатости контактной поверхности) до и после поляризации.

стности, отражает результаты экспериментов, полученные при скольжении стального сферического индентора по бронзе, чугуну и стали в щелочной среде. В слабкокислой среде влияние поляризации оказалось наиболее ощутимым при трении чугуна: микрошероховатость его поверхности увеличилась почти в два раза.

Влияние поляризации на состояние поверхностей трения и свойства пленок вторичных структур сказались как на величине, так и на характере изменения электрического сопротивления контакта. При этом выяснилось, что колебания контактного сопротивления зависят от знака поляризации и магнитного состояния протрибуемого образца.

Поляризационный эффект, выразившийся в изменении степени изнашивания металлов и шероховатости рабочих поверхностей, наблюдался авторами при торцовом трении полых цилиндрических образцов из стали 45 и бронзы в щелочной среде.

Что же касается влияния поляризации на характер формирования при трении дислокационной структуры, то для наиболее четкого его проявления авторы выбрали в качестве объекта исследования монокристаллы кремния, в которых силы Пайерлса — Набарро весьма значительны. Тем самым как бы обеспечивалась благоприятная возможность исключить влияние случайных деформаций.

Опыты проводились с индентором из металлокерамического твердого сплава ВК6. Их результаты резюмированы в работе

[151] следующим образом: «Исследование влияния поляризации на дислокационную структуру деформированной зоны в монокристаллах кремния показало, что катодная поляризация способствует пластифицированию рабочей поверхности, вызывает уменьшение неравновесной концентрации дислокаций и глубины деформированной зоны. При анодной поляризации происходит растворение экранирующих поверхностных пленок, содействующее увеличению локальной концентрации деформаций и охрупчиванию поверхности трения».

Упоминание об образовании гальванических пар *обрабатываемое изделие — инструмент* встречается в работе Якунина и Мирбабаева [130], однако авторы не затрагивали вопрос о возможности протекания окислительно-восстановительных реакций в зоне резания и ограничились лишь проверкой искажающего влияния гальвано-в.д.с. на показания естественной термопары. Необходимость сделать переоценку установившихся взглядов, игнорирующих электрохимическую природу явлений при резании с применением электропроводных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), подчеркивалась в работе [25]. Автором отмечалось, что эффективность действия СОЖ может быть непосредственно связана с ее электролитическими свойствами, если резец и деталь в данной среде могут рассматриваться как два электрода, состояние поверхности и неравновесные электрические потенциалы которых во многом определяют характер и скорость протекающих на них процессов. В то же время указывалось, что специфика работы естественного гальванического элемента при резании связана с непрерывным изменением физико-химического состояния трущихся поверхностей и форм структуризации пограничных пленок. По мере приближения к режущей кромке или, точнее, к очагам интенсивного тепловыделения переход смазочной фазы из жидкого в жидко-капельное и парообразное состояние<sup>1</sup> осуществляется все быстрее. В условиях, соответствующих сходу стружки по контактным поверхностям инструмента, не исключена вероятность даже полного термического и каталитического распада молекул смазки. Поэтому наиболее устойчивой частью гальванического элемента является система *резец — раствор электролита — изделие* на границах области контакта стружки с передней поверхностью инструмента и задних поверхностей инструмента с обрабатываемой деталью. В местах, расположенных недалеко от режущей кромки, окислительно-восстановительные реакции могут протекать на одном из электродов. Это, по сути, явления коррозии [14, 111].

Большинство соображений автора, относящихся к электрохимической проблематике трения и резания, носило априорный характер. Некоторые из них уже нашли экспериментальное под-

<sup>1</sup> Строго говоря, по сравнению с растворителем (пар) агрегатное состояние растворенного вещества может быть совершенно иным (расплавы).

<sup>1</sup> А также в 45%-ном водном растворе углеводов.

тверждение, в частности в модельных испытаниях, проведенных Коробовым, Кузнецовым и др. [153].

Принципиально новым и, на наш взгляд, наиболее интересным результатом этих испытаний является вывод о возможности эффективного управления процессом резания в электролите путем поляризации с помощью вспомогательного электрода одного из элементов пары *инструмент — детали*, когда другой ее элемент не является электропроводным (при абразивной обработке, при использовании минералокерамических пластины или при резании металлическим инструментом диэлектриков).

Мы уже останавливались на том, каким образом фактор реверсивности трения отражается на термодинамическом состоянии поверхностных слоев металла, подвергнутых механической и термической активации (см. § 2). Измерения величины электродного потенциала позволили установить [154], что реверсивность трения скольжения значительно повышает электрохимическую активность сталей.

Электрохимическим реакциям, относящимся к комплексу явлений, свойственных процессам трения и резания, чаще приписывают отрицательную, нежели положительную роль, оценивая ее степень коррозионного разрушения поверхностей. Однако эти же реакции позволяют по-новому подойти к борьбе с износом благодаря обнаруженному Гарзуновым и Крагельским явлению избирательного переноса при трении [155]. Учитывая важность разработок, направленных на всестороннее изучение условий, благоприятных для реализации избирательного переноса, остановимся на некоторых из них подробнее.

#### § 7. Электрические явления при трении в режиме избирательного переноса

Известно, что при избирательном переносе (ИП) происходит самопроизвольное формирование контактирующих поверхностей и трение протекает между подвижными слоями свободных от окислов и обогащенных медью пленок. Псевдооживленное состояние таких пленок вызывает распределение давления на значительно большую площадь контакта уже в начальной стадии процесса. Коэффициент трения резко снижается, а реализация правила положительного градиента механических свойств по глубине способствует проявлению эффекта безыносности.

Скорость образования сервопитных пленок на сопряженных металлах или сплавах зависит от восстановительной способности смазочной среды, наличия в ней новых окислителей, от активности головных групп полярных молекул, облегчающих поверхностное диспергирование и др. Однако тем решающим фактором, который предопределяет возможность и быстроту создания условий, благоприятных для инициирования ИП, является режим работы



Рис. 55. Полосы скольжения на оплавленной поверхности меди, образованные выступами шероховатости полибелового индентора.  $\times 200$

фрикционного контакта в начальный период. Как видно из работы [25], например, в области высоких скоростей скольжения, удельных нагрузок и температур даже при отсутствии смазок, ответственных за протекание ИП, на поверхности могут образоваться подвижные слои металла (рис. 55). Между тем подобные условия образования тонкого оплавленного слоя, действующего в качестве естественной смазки, для абсолютного большинства пар трения неприемлемы. Появление такого слоя предшествует катастрофический износ поверхностей (рис. 56—58). При трении металлов с низким энергетическим порогом схватывания вырывание частиц становится настолько интенсивным, что последующее размазывание жидкой фазы по поверхности твердого тела маскирует глубокие изъязвы (рис. 59). Применение смазки может радикально изменить характер фрикционного взаимодействия. Однако и в случае трехфазной системы *медный сплав — глицерин — сталь*, для которой наиболее характерны физико-химические процессы, присущие избирательному переносу, высокие удельные нагрузки приводят к явно выраженному схватыванию металлов и намазыванию медного сплава на поверхность стали. Лишь спустя некоторое время, когда за счет избирательного растворения медного сплава на поверхностях трения возникнут квазижидкие пленки меди, интенсивный износ прекращается. При этом нормальному протеканию процесса фрикционного взаимодействия активно способствует хемосорбция продуктов, появившихся в результате механодеструкции и термохимических превращений глицерина. Адгезия трущихся тел заметно ослабевает при сравнительно малых нагрузках, если температура в зоне контакта недостаточно высока для преодоления энергетического порога схватывания. Тогда при наличии глицериновой смазки, восстановительная способность которой снижается из-за увеличения концентрации альдегидов, сервопитная пленка меди образуется непосредственно на стали в результате атомарного переноса [76].



Рис. 56. Оведшие констативного инвертора.  $\times 200$



Рис. 57. Задры на алюминитовой пленке, обволакивающей медную поверхность.  $\times 200$



Рис. 58. Микрофотография стальной поверхности с приставшей к ней частицей более мягкой стали.  $\times 200$



Рис. 59. Раковина на медном образце, оставшаяся под слоем естественной смазки.  $\times 200$

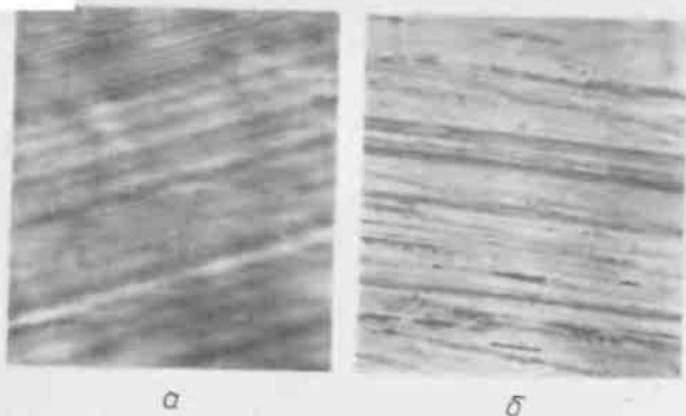


Рис. 60. Микрофотография поверхностей медных образцов после работы в паре со сталью в среде 3%-ного раствора  $\text{Na}[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_3]$  (а) и жидкого парафина средней вязкости (б).  $\times 200$

Под влиянием свободной от окислов металлической поверхности и кислорода воздуха продукты распада и превращений молекул смазки полимеризуются; если в смазочный состав входят фракции, содержащие смолы, то на контакте могут протекать реакции поликонденсации, приводящие к образованию полимерной «вешушки» [156, 157], что характерно для повышенных температур. С такого рода реакциями и было, вероятно, связано десятикратное уменьшение коэффициента трения, когда для пары медь — углеродистая сталь вместо поверхностно-активной смазочной среды — раствора натривной соли монододецилового эфира серной кислоты — использовалось чистое парафино-нафтеновое минеральное масло, совершенно свободное от полимерных компонентов [158]. Об изменении состояния медной поверхности, выразившемся прежде всего в изменении степени и характера ее окисленности, можно судить по микрофотографиям, приведенным на рис. 60.

Как следствие автоматически действующего электрохимического механизма управления износом между фазовыми поверхностями металлов образуется специфический граничный комплекс с послойной структурой (рис. 61) [156, 159]. Именно такой подвижный «сэндвич» и обеспечивает, как вполне логично предположить, минимальный износ и коэффициент трения в условиях ИП.

В стадии приработки поверхностей, наиболее ответственной за установление режима ИП, весьма значительная роль может принадлежать термоэлектрическим явлениям. Согласно [1, 2],

например, термоток — стимулятор адгезии, он также влияет и на кинетику окислительных процессов.

Развивая идею автора об анализе особенностей работы фрикционных систем с помощью эквивалентных электрических схем, Мельниченко [15] начал изучение специфики трения в условиях ИП с электрического моделирования фрикционного контакта. При этом он основывался, с одной стороны, на адсорбционной теории двойного электрического слоя, строение которого, по Штерну, должно соответствовать некоторому сочетанию моделей, предложенных Гельмгольцем и Гуви, а с другой — на представлении о строении граничного слоя при лабирательном переносе, показанном на рис. 61.

Эквивалентная схема, приведенная на рис. 62, отвечает простейшему случаю, когда соприкосновение разнородных металлов происходит по всей поверхности и фрикционную пару можно рассматривать как источник термоэ.д.с. с внутренним сопротивлением, равным сопротивлению фактического контакта.

Значительно более сложной выглядит модель системы, которая состоит из двух электродов, разделенных слоем смазки, проявляющей хотя бы слабые электролитические свойства (рис. 63). Вспомним, кстати, что даже дистиллированная вода способна приобретать свойства слабого электролита, что связано с растворением в ней газов, входящих в состав воздуха, и частности двуокиси углерода. Последняя, образуя угольную кислоту, заметно увеличивает электропроводность воды:

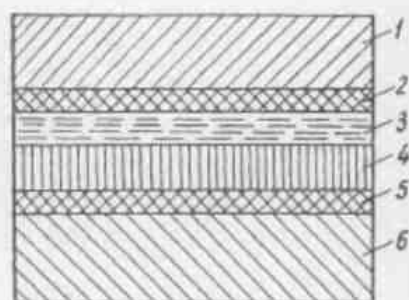


Рис. 61. Строение граничного слоя при избирательном переносе (по Д. Н. Гаркунову):

1 — сталь; 2 — односторонний потенциалопорный слой воды; 3 — полимеризованные молекулы; 4 — слой адсорбированных молекул границы; 5 — односторонний потенциалопорный слой воды; 6 — медный сплав

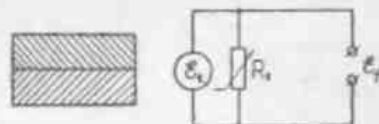
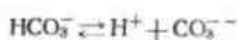


Рис. 62. Модель фрикционного контакта при непосредственном соприкосновении трущихся поверхностей [15]





При построении этой модели Мельниченко были учтены емкости двойных слоев, состоящие из последовательно соединенных диффузных и гельмгольцевских составляющих<sup>1</sup>, емкость адсорбционная, обусловленная сосредоточением (удерживанием) ионов у поверхности металлов за счет сил специфической адсорбции,

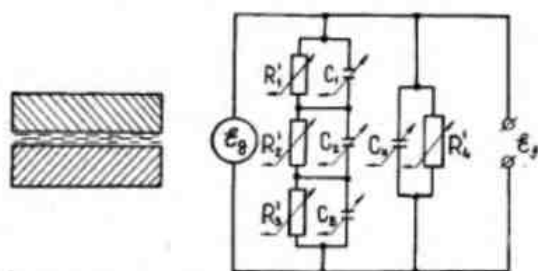


Рис. 63. Модель фрикционного контакта при наличии промежуточной фазы между сопряженными элементами пары трения [15]

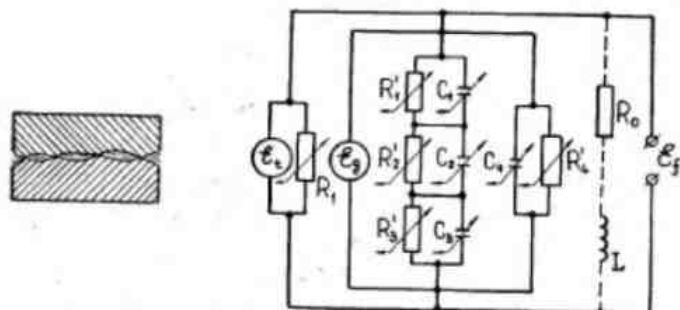


Рис. 64. Эквивалентная электрическая схема фрикционного контакта [15]

т. е. сил некулоновского происхождения, а также межэлектродная емкость, отражающая способность трущихся поверхностей накапливать электрические заряды.  $R_1, R_2, R_3, R_4$  — соответствующие сопротивления утечки.

Полная эквивалентная схема, отвечающая действительному состоянию контакта, представлена как сочетание рассмотренных

<sup>1</sup> Они примерно соответствуют диффузионной и барьерной емкости  $p-n$  структуры [15].

схем, характеризующих предельные случаи (рис 64). Параллельно включенные источники термо- и гальвано-э.д.с. с их внутренними сопротивлениями показаны в ней замкнутыми на некоторое переходное сопротивление внешней цепи ( $R_0$ ), причем учитывается индуктивность системы ( $L$ ), хотя и весьма малая [26].

Как отмечает Мельниченко, стабилизация параметров трения в условиях ИП позволяет пренебречь реактивным сопротивлением контакта и упростить эквивалентную схему (рис. 65). После этого она несравненно легче поддается анализу и расчету, к чему мы и переходим, следуя работе [15].

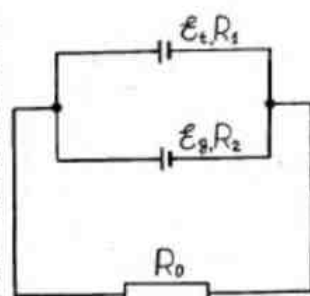


Рис. 65. Упрощенная эквивалентная схема фрикционного контакта [15]

Внутренние сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  являются неизвестными, в то же время сопротивление фактического контакта намного меньше сопротивления электролита (глицерин), почему и нельзя пренебрегать вкладом термо-э.д.с. и интегральную э.д.с. системы. Воспользовавшись принципом суперпозиции и положив  $g_1 + g_2 = g$ , Мельниченко получил следующие выражения для проводимостей  $g_1$  и  $g_2$  через доступные прямым измерениям интегральную э.д.с.  $E_f$  и суммарную проводимость  $g$ :

$$g_1 = \frac{E_f - E_e}{E_f - E_e} g; \quad (2.30)$$

$$g_2 = \frac{E_f - E_i}{E_e - E_i} g. \quad (2.31)$$

Как видим, если экспериментальным или расчетным путем оценить значения  $E_i$  и  $E_e$ , то, измеряя  $E_f$  и  $g$ , можно проследить (путем вычислений) за изменением сопротивления металлического контакта и сопротивления фрикционного гальванозлемента при конкретных режимах скольжения.

Из выражений (2.30) и (2.31) имеем

$$E_f = \alpha E_i + \beta E_e, \quad (2.32)$$

где  $\alpha = R/R_1 = 1 - R/R_2$ ;  $\beta = R/R_2 = 1 - R/R_1$ .

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  характеризуют относительный вклад в интегральную э.д.с. источников термоэлектрического и электрохимического происхождения. Это нетрудно проверить, определяя значения  $\alpha$  и  $\beta$  для предельных случаев. Действительно, если

$R_1=R$ , а  $R_2=0$ , то  $\alpha=1$ , а  $\beta=0$ , что эквивалентно отсутствию источника гальвано-э.д.с. в зоне контактного взаимодействия. При  $R_1=0$  и  $R_2=R$ , наоборот,  $\alpha=0$ , а  $\beta=1$  и, стало быть,  $\mathcal{E}_j=\mathcal{E}_g$ .

Мельниченко подчеркивает, что знак регистрируемой величины  $\mathcal{E}_j$  зависит от знака алгебраической суммы  $\alpha\mathcal{E}_i+\beta\mathcal{E}_g$ . Переход этой суммы через нуль является условием инверсии интегральной э.д.с., что также можно использовать при вычислении значений  $R_1$  и  $R_2$ .

В свете изложенного открылась новая возможность применения эквивалентной электрической схемы трехфазной фрикционной системы, а именно — для контроля за поведением фактической площади контакта ( $S$ ) и усредненной толщины смазочной прослойки ( $H$ ) между трущимися поверхностями. Первостепенное значение при этом имеет то обстоятельство, что предложенный Мельниченко и излагаемый ниже способ позволяет производить количественную оценку изменений величин  $S$  и  $H$  непосредственно в процессе трения непрозрачных твердых тел (реальных деталей), чем он выгодно отличается от известных ранее методов [119, 121, 160—163]. Для достижения поставленной цели оказалось достаточным измерять значения  $\mathcal{E}_j$  и  $R$  в присутствии смазки, исключая образование окисных пленок на поверхностях трения, что и является как раз характерным для режима ИП, а затем вычислять значения  $g_1$  и  $g_2$  по формулам (2.30) и (2.31).

Интересующая нас связь проводимости  $g_1$  с площадью фактического контакта, а проводимости  $g_2$  — с толщиной смазочного слоя видна, например, из следующих формул:

$$S = r_1^2 / 4\pi R_1^2 \quad (2.33)$$

и

$$H = R_2 (S_n - S) / r_2 \quad (2.34)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — удельные сопротивления.

Формула (2.33) написана для случая контакта сферы с плоскостью [117]. В других случаях контактирования она будет другой, что не повлияет на окончательный результат при  $S \sim 1/R_1^2$ .

Согласно формулам (2.33) и (2.34), чтобы оценить изменения фактической площади контакта трущихся непрозрачных тел, а также изменения толщины смазочной прослойки между ними, необходимо воспользоваться очевидными соотношениями

$$S/S_0 = g_1^2 / g_{10}^2 \quad (2.35)$$

$$H/H_0 = g_{20} / g_2 \quad (2.36)$$

Излишне обосновывать, насколько важной является информация о поведении указанных параметров в зависимости от внешних факторов (время скольжения, нагрузка и др.), тем более если

эта информация получена непосредственно в процессе эксплуатации фрикционной системы.

В работе [15] отмечается, что при исследовании изменений  $S$  и  $H$  в условиях избирательного переноса стабилизация значений этих параметров, отличающихся для различных пар трения, типов смазки и условий процесса, начинается уже в период приработки поверхностей и фактически заканчивается в стационарном режиме ИП. Автор заключает, что, «контролируя характер изменения параметров  $S$  и  $H$ , можно прогнозировать работу скользящих контактов в различных смазках. Малое значение величины  $S$  свидетельствует о работе контакта в режиме граничного трения; увеличение  $S$  и уменьшение  $H$  до некоторой постоянной для данных условий величины свидетельствует о переходе трения в режим установившегося ИП. Тем самым подтверждается возможность еще более обоснованного подбора материалов, смазок и режимов трения, способствующих реализации условий, благоприятных для ИП».

Хорошей иллюстрацией применения нового способа является рис. 66, отражающий результаты испытаний фрикционной системы латунь — глицерин — сталь при сравнительно высоких удельных нагрузках.

Как показали результаты экспериментов Мельниченко<sup>1</sup>, контролировать характер протекания переходных процессов при установлении ИП и благодаря этому предсказывать износостойкость материалов, составляющих пару трения, можно и по самим кривым  $\mathcal{E}_j=f(\tau)$  и  $R=f(\tau)$ , т. е. не определяя значений  $S$  и  $H$ .

Величины интегральной э.д.с. и контактного сопротивления находились с помощью установки, принципиальная электрическая схема которой приведена на рис. 67; величина  $\mathcal{E}_j$  — по записям на осциллографе Н700 с применением гальванометрического фотоувеличителя Ф18; величина  $R$  — методом амперметра-вольтметра. Перед испытанием образцы обезжиривались и приработывались до полного прилегания рабочих поверхностей. Чтобы свести до минимума побочное искажающее влияние внешних термо-э.д.с., соединительные провода и измерительной цепи подбирались по возможности термоэлектрически идентичными, а в местах соединений обеспечивался относительно стабильный тепловой режим.

<sup>1</sup> Они обсуждались в личной переписке с автором.

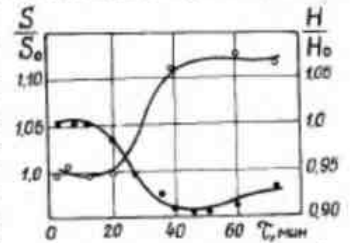


Рис. 66. Зависимость площади фактического контакта (○) и толщины смазочной прослойки (●) в относительных единицах от времени процесса для пары трения латунь Л63 — сталь У8 в среде глицерина [15]

В зависимости от сочетания находящихся в сопряжении материалов, а также свойств и толщины появляющихся на них покрытий процесс установления ИП протекает по-разному. Однако наиболее характерным вариантом его развития при повышенных нагрузках является намазывание медного сплава на сталь с последующим образованием на поверхностях трения вязкой медной пленки. Формирование такой пленки при обильной смазке и благоприятном тепловом режиме становится возможным благодаря восстановительной способности глицерина (она обеспечивает отсутствие окисления намазанного слоя) и его электрохимической активности по отношению к медному сплаву. Явление

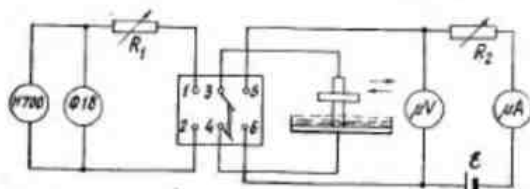


Рис. 67. Принципиальная электрическая схема установки для исследования э. д. с. и контактного сопротивления при трении (по И. М. Мельниченко)

фрикционного латунирования и появление вслед за ним сервопитной пленки меди, отчетливо наблюдаемой визуалью, служили как раз основными критериями, помогающими различать начальную и конечную стадии в развитии ИП. Кроме того, по мере установления ИП наблюдалось монотонное убывание момента трения и его стремление к определенному установившемуся значению, отвечающему режиму скольжения.

Типичные зависимости э. д. с. и контактного сопротивления от времени для пар медный сплав — сталь при малых скоростях скольжения и высоких удельных нагрузках приведены на рис. 68, при сравнимых с этим случаем скоростях и низких нагрузках — на рис. 69.

Из сопоставления зависимостей видно, что и в стадии приработки поверхностей, и во время окончательного перехода в режим ИП э. д. с. и контактное сопротивление трущихся систем на порядок меньше при высоких нагрузках, чем при низких. Такое различие величины нельзя считать неожиданным; его можно было предвидеть, учитывая известные представления о зоне трения как об источнике одновременно действующих э. д. с. термоэлектрического и электрохимического происхождения [11]. Что касается влияния других источников на величину интегральной э. д. с., то оно считалось пренебрежимо малым на основании сравнения токов, обусловленных экзоэлектронной эмиссией

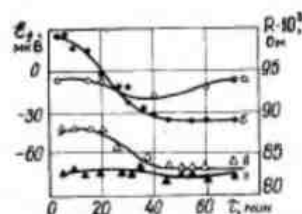


Рис. 68. Зависимость э. д. с. и сопротивления контакта в зависимости от времени трения (по И. М. Мельниченко):

1, 2 — латунь Л63 по стали 28 (удельная нагрузка  $p=6 \text{ мН/м}^2$ ; скорость скольжения  $v=0,16 \text{ м/с}$ ); 3, 4 — сплав ЛМЦС 50-5-2 по стали 28 ( $p=7 \text{ мН/м}^2$ ;  $v=0,15 \text{ м/с}$ )

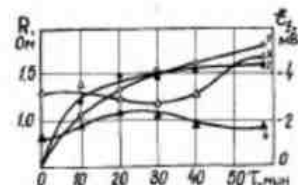


Рис. 69. Зависимость величины э. д. с. (1, 2) и контактного сопротивления (3, 4) от времени трения тех же образцов (рис. 68) в среде глицерина при удельных нагрузках 0,2 и 0,1 мН/м<sup>2</sup> и скоростях скольжения 0,3 и 0,15 м/с соответственно (по И. М. Мельниченко)

( $<10^{-10} \text{ А}$ ), трибоэлектронной эмиссией ( $\sim 10^{-9} - 10^{-8} \text{ А}$ ) [164] и совместным действием источников, о которых шла речь ( $\sim 10^{-4} - 10^{-3} \text{ А}$ )<sup>1</sup>.

В стационарном режиме ИП величина интегральной э. д. с. имеет тот же порядок, что и ее термоэлектрическая составляющая. Если изменение условий трения и, следовательно, состояния границы раздела приведет к выравниванию внутренних сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  ( $\alpha=\beta$ ), то при противоположной полярности  $E_1$  и  $E_2$  величина интегральной э. д. с. окажется равной нулю. Естественно, что в перекompенсации одной из составляющих  $E_1$  и кроется причина ее инверсии. На наш взгляд, однако, это не единственная причина инверсии: смена полярности фрикционного источника э. д. с. может наблюдаться в результате асимметричного скольжения образцов, изменения термоэлектрических характеристик материалов при их поверхностном и диффузионном окислении (см. § 5), физико-химического модифицирования поверхностей при участии смазочных компонент [165] и т. д.

В одной из последних работ Мельниченко, с которой автор имел возможность познакомиться в рукописи<sup>2</sup>, исследовано коррозионное поведение медно-цинковых сплавов в статике и изменение защитных свойств сервопитных пленок при трении. Сделано это посредством измерений величины электродного потенциала, которая, как мы уже знаем, предопределяет кинетику электродных процессов и свойства поверхностных структур в зоне фрикционного взаимодействия.

<sup>1</sup> Как показали эксперименты, проводимые в лаборатории автора, данный вопрос еще требует специальной и к тому же очень тщательной разработки (см. гл. IV, § 1).

<sup>2</sup> Работа называется «О влиянии трения на защитные свойства поверхностных структур».

С учетом основных факторов, приводящих к облагораживанию или, наоборот, разоблагораживанию потенциала сплава, в первой части работы анализируется взаимосвязь кривой потенциал — состав с диаграммой состояния, которая затем сопоставляется с данными Полякова [166] о соответствии между диаграммой состояния и износостойкостью сплава. В результате такого сопоставления была обнаружена явная корреляция между износостойкостью сплава и его потенциалом для латуней, что, как предполагается, обусловлено зависимостью указанных величин от состава, тонкого строения и защитных свойств поверхностных слоев.

Схематическое изображение установки, с помощью которой осуществлялось измерение электродных потенциалов при трении, показано на рис. 70. С целью уменьшения омических потерь хлорсеребряный электрод сравнения ЭВЛ-1М подводился к испытываемому образцу как можно ближе, для чего использовался *Л*-образный электролитический ключ, наполненный насыщенным раствором КСl и агар-агаром.

Рис. 70. Узел трения установки для измерения электродных потенциалов при трении (по И. М. Мельниченко):

1 — изолирующая ванна; 2 — нижний вращающийся образец; 3, 4 — верхние неподвижные образцы; 5 — электрод сравнения

Л62 — сталь 40, находящейся в среде глицерина (кривая 1 на рис. 71). За нулевую точку отсчета принималось установившееся значение потенциала образца, вращающегося в ванне без приложения нагрузки. Одновременно находилось и соответствующее изменение коэффициента трения (кривая 2). Нетрудно убедиться в том, что наибольшие смещения электродного потенциала и явно выраженные максимумы трения практически совпадают по времени.

На основании анализа полученных результатов Мельниченко пришел к выводу об однозначном соответствии величины электродного потенциала и состояния поверхности сплава. В работе затрагивается вопрос об условиях подвижного равновесия процессов разрушения и восстановления поверхностных структур; подчеркивается, в частности, что оптимальный режим ИП наступает при той предельно малой толщине серовитной пленки, которая еще остается достаточной для пассивации сплава и обеспечения пластичности. Чтобы точнее охарактеризовать защитные свойства пленок, был использован метод зачистки поверхности

электрода в среде электролита, широко применяемый в коррозионных исследованиях.

В заключение следует отметить, что, несмотря на ограниченный диапазон проявления ИП в конкретных узлах трения (имеются в виду ограничения по скоростям скольжения, температурам, удельным нагрузкам, применяемым материалам и смазкам [156]), резервы привлечения этого явления для решения практических задач далеко еще не исчерпаны. Кроме уже упоминав-

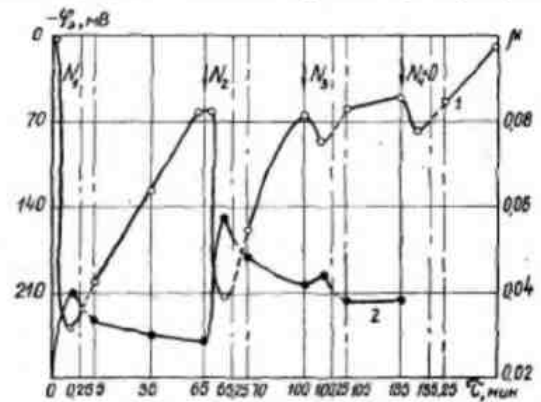


Рис. 71. Изменение электродного потенциала (1) и коэффициента трения (2) во времени при нагружении и снятии нагрузки (по И. М. Мельниченко)

шихся исследований, об этом говорят работы, в которых, например, показаны: способность поверхностно-активных присадок вызывать избирательный перенос в слабоактивных или инертных маслах и воде [167, 168], рост несущей способности смазочного слоя, содержащего органометаллические соединения (за счет фрикционного металлоцлакирования) [169], возможность определения как селективного, так и суммарного износа медных сплавов в среде глицериновой смазки полярографическим методом [170] и т. п.

### Глава III

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ГРАНИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ

### § 1. Введение

Не имея четкого представления о том значении, какое имеют электрические свойства цепных молекул углеводородов для механизма образования граничных слоев, невозможно понять и электрические свойства самих этих слоев как двухмерных молекулярных коллективов. В то же время, не зная специфики состояния тонкого слоя смазки, разделяющего твердые поверхности и находящегося в пределах их влияния на смазочное вещество, беспроблемно говорить о несущей способности слоя, под которой, как это и принято, мы имеем в виду способность смазочной пленки предотвращать непосредственный контакт между трущимися телами, в данном случае — металлами.

Положение, однако, облегчается наличием превосходной монографии [32], которую, по мнению ее автора, можно было бы назвать «Введением в учение о граничном состоянии вещества и молекулярную физику граничных слоев, образованных на поверхности металла крупными цепными молекулами органических веществ». Ссылаясь на эту монографию, есть все же определенный смысл дать очень краткое реферативное изложение отдельных ее фрагментов, подчинив его решению поднятых вопросов применительно к одному из рубежных режимов граничного трения<sup>1</sup>. Характерной особенностью такого режима является возможность окисленных, но физико-химически чистых поверхностей находиться в состоянии как прямого металлического контакта, так и соприкосновения «через» слой смазочной фазы — одиночные адсорбированные молекулы органических соединений или их изолированные пакеты.

Среди факторов, которые определяют содержание процесса фрикционного взаимодействия металлов в присутствии многокомпонентных технических смазок, нас сейчас прежде всего интересуют:

- а) структура и свойства молекул смазочного состава;
- б) характер адантирования молекул на поверхности твердого тела;

<sup>1</sup> Согласно классификации видов трения, предложенной А. С. Ахматовым [32].

в) особые условия существования граничного слоя, заключенного в межфазном целевом пространстве.

В связи с этим обратимся к представлениям классического характера и отметим, в частности, следующее:

— сообразно строению основного скелета своей молекулы органические соединения делятся на три класса: ациклические, карбоциклические и гетероциклические. Наибольшее распространение в качестве смазок получили вещества первого класса — алифатические углеводороды, молекулы которых имеют нитеобразную (нематическую) форму в нормальном трансизомерном состоянии;

— отдельные атомные группы и радикалы, входящие в состав цепных молекул жирных кислот, спиртов, эфиров и некоторых других производных гомологического ряда углеводородов, имеют электрический момент. У нейтральных в электрическом отношении цепей слабый введенный момент может появиться под действием «стороннего» дипольного звена [171]. Вынужденная поляризация метиленовой цепи может быть также следствием ее механической деформации при трении с нагрузкой [172];

— при образовании газовой или жидкой фазы молекулы, имеющие цепное строение, склонны как к перемещениям в качестве жестких систем, так и к деформациям своей структуры в сторонних силовых полях (нарушение постоянства относительного расположения элементов, вращение звеньев цепи). Соотношение между величиной деформации (степенью отклонения системы от положения равновесия, отвечающего минимуму потенциальной энергии) и вызывающими ее силами зависит от характера взаимодействия частиц;

— между крупными молекулами углеводородов, электрически в целом нейтральными, действуют силы Ван дер Ваальса, а также особая категория сил, называемая водородной связью;

— на вид ассоциации молекул органических соединений влияет природа среды, в которой происходит растворение важнейших компонент смазки;

— физические свойства вещества с нематическим строением могут кардинально измениться при усилении или ослаблении взаимодействия между боковыми группами соседних цепей (поперечных когезионных связей);

— отталкивание электронных оболочек атомов при их сближении накладывает существенные ограничения на свободу внутримолекулярного вращения метиленовых цепей углеводородов (вплоть до их полной иммобилизации);

— в кристаллической решетке углеводородов у метиленовых цепей сохраняется лишь одна степень свободы — возможность осевого вращения. Молекулы в подобных условиях могут рассматриваться как весьма жесткие атомные комплексы, если принять во внимание чрезвычайно высокое значение модуля осевой упругости у метиленовых цепей;

— при наличии достаточной энергии активации (например, с ростом температуры), несмотря на торможение внутримолекулярного вращения, происходит образование поворотных изомеров метиленовых цепей. Поэтому углеводороды с цепным строением молекул содержат в жидком или растворенном состоянии не только прямолинейные цепи, но и запутанные клубки цепей. Влияние температуры сводится к смещению временного статистического равновесия либо в сторону преобладания линейных форм (эффект кристаллизационного вымораживания поворотных изомеров), либо в сторону возникновения новых сложных конфигураций;

— компоненты смазок и присадки к ним отличаются большим разнообразием; то же самое можно сказать и об агрегатном состоянии смазочного состава; смазки применяются в виде истинных или коллоидных растворов, эмульсий или суспензий с различной степенью дисперсности. Засорение смазочных материалов водой, растворами кислот, солей и т. п. придает им слабые электролитические свойства, несмотря на отсутствие электрохимически активных присадок, вносимых произвольно;

— ювенильной поверхности металла как носительнице значительного запаса свободной энергии, особенно на границах между кристаллитами и в точках, принадлежащих контурам, очерчивающим вихри, присуща разносторонняя физико-химическая активность. Она обладает большой адсорбирующей способностью;

— связь атомов и молекул первичного монослоя с твердой поверхностью может быть как химической (ковалентной), так и носить характер ван-дер-ваальсовых сил (ориентационных, индукционных или дисперсионных);

— указанные два типа связи могут иметь место одновременно на одной и той же поверхности металла с различной химической активностью ее участков (кристаллитов);

— пленка металлического мыла — продукта химической реакции между жирной кислотой и металлом — способна без разрушения выдерживать значительные деформации, что приводит к резкому уменьшению металлического контакта поверхностей. По мере возрастания температуры мыла размягчаются и теряют свои защитные свойства;

— кинетика физической адсорбции определяется условиями взаимодействия силового поля конденсированной фазы с полями атомов и молекул смазочной среды. Степень ориентации и целостность молекул на поверхности твердого тела зависят от его природы;

— наиболее ценными компонентами смазок являются цепные полярные молекулы органических соединений, которые ориентируются в поле твердого тела, перемещаются по направлению к источнику поля и своими центрами электростатического притяжения прочно фиксируются на поверхности кристаллического

зерна металла за счет энергии адсорбционной связи. Они способны к устойчивой вертикальной ориентации;

— электрический момент неполярных углеводородов, входящих в состав минеральных смазочных масел и консистентных смазок, равен нулю. Молекулы неполярных углеводородов приходят к состоянию горизонтальной ориентации как к состоянию минимума потенциальной энергии системы, они не связаны с поверхностью твердой фазы специфическими силами взаимодействия. Поэтому физические свойства неполярного вещества в граничных условиях существенно не отличаются от его объемных свойств;

— в случае многокомпонентных систем, каковыми являются большинство технических масел, наблюдается конкурентная (селективная) адсорбция молекул поверхностно-активных веществ (с преимущественным отбором линейных форм);

— по мере уплотнения адсорбционный слой как коллектив молекул приобретает особые свойства под влиянием сильного локального поля металлической поверхности, способного нарушить распределение зарядов молекул и, следовательно, их структуру;

— в результате тепловых соударений адсорбированных молекул происходит их двухмерная миграция вдоль эквипотенциальных уровней поверхности металла, а также переход молекул с одного энергетического уровня, принадлежащего полю кристаллической решетки, на другой, смежный с ним;

— любое данное состояние слоя следует рассматривать с точки зрения его стремления к динамическому равновесию при молекулярном обмене с внешней средой, когда скорости адсорбции и десорбции равны;

— на характер взаимодействия полярных органических молекул с поверхностью металла глубокое влияние оказывает наличие пленок воды (как более сильного адсорбента) и степени ее кислотности;

— под действием поля поверхности металла органические вещества, построенные из димеров (жирные кислоты), приобретают отсутствовавшую ранее упругость формы и свойства кристаллического твердого тела. В граничных условиях возможны все основные формы структуризации смазочного слоя — его твердое, кристаллообразное, жидкое, жидко-капельное, газообразное и другие состояния;

— когда адгезия жидкости превышает ее собственную когезию, жидкость начинает растекаться на поверхности металла. Так, например, неполярные масла способны к неограниченному растеканию по поверхности стали [45], в то время как полярные вещества подобным свойством не обладают;

— при наложении друг на друга двух металлических поверхностей, несущих граничные слои, протекают особые процессы формирования и стабилизации объединенной структуры в мощ-

ном электромагнитном флуктуационном поле щелевого капиллярного пространства. Физические свойства квазикристаллических молекулярных коллективов, находящихся под двусторонним влиянием конденсированных фаз (даже на расстоянии в сотни и тысячи ангстрем от них), могут в значительной степени отличаться от свойств граничных слоев, образовавшихся на поверхности одиночной фазы;

— толщина граничного слоя между гребнями металлических поверхностей при их сближении соответствует мономолекулярной. Исключительно высокое сопротивление сжатию пленок органических соединений определяется механизмом атомной упругости углеродных цепей, вертикально ориентированных по отношению к отдельным площадкам твердых тел с относительно равномерно распределенной нагрузкой.

Становится все более очевидным, какую сложную совокупность явлений представляет собой трение шероховатых поликристаллических поверхностей при наличии несовершенной граничной смазки, когда микрогеометрический профиль не нивелируется смазочным веществом. В этих условиях плотность адсорбированных молекул не достигает, как правило, значения, соответствующего конденсированному состоянию слоя; активная смазка в лучшем случае может находиться в жидко-кристаллическом состоянии, и нет оснований ожидать образования на поверхности металла граничных структур, обладающих очень высокой механической прочностью; одной из возможных форм существования вещества в щелевом капиллярном пространстве, наряду с одиночными островками ориентированных молекул и жидких пленок неполярной среды-растворителя, являются коммуницирующие участки газообразной межфазовой прослойки. Время адсорбционного заполнения обнаженных металлических площадок при локальных разрушениях покрытия (латентный период), скорость поверхностной миграции молекул и характер их контактной аккомодации, величина энергии связи частиц с поверхностью — все это имеет большое техническое значение с точки зрения восстановления (многократной регенерации) смазочных пленок при трении металлов. Если граничная система, находящаяся в рубежном состоянии при незначительном по величине термическом, механическом, электромагнитном и тому подобном воздействиях, то приходится рассматривать мгновенные состояния и неравновесно-гистерезисные процессы в молекулярной структуре газовой-жидкой органической пленки, на фазовых поверхностях твердого тела и в его поверхностных слоях [25].

Понятно, что в предвидении возможного разрушения смазочной пленки (вплоть до термического распада граничного слоя) целесообразно добавлять в инертную углеводородную среду поверхностно-активные вещества, тем более способные переходить из адсорбционного (ван-дер-ваальсового) в химическое

взаимодействие с металлами, отличающееся значительно большей энергией связи. Молекулы металлического мыла, например, достаточно прочно связаны с кристаллической решеткой металла или его тугоплавкого окисла даже при повышенных температурах; в то же время они препятствуют распространению коррозионного процесса в глубь твердой фазы. Заметим, кстати, что в этой связи представляют несомненный интерес исследования топонимических реакций образования граничных слоев жирных кислот на поверхности металла и разработка методов оценки предельной смазочной способности технических масел [173—175 и др.].

На примере изучения противозносных свойств эфиров фосфорных и хлорфосфорных кислот, используемых в качестве присадок к маслам, показано [176], что для объяснения некоторых особенностей в поведении присадок достаточно исследовать их адсорбционную способность путем измерения потенциала поверхности металлического адсорбента. Систематическое исследование функциональных свойств смазочных материалов — моющих, антикоррозионных, противозносных, противозадирных — с помощью измерений контактных потенциалов, возникающих на границе раздела металл — масло, а также исследование тех изменений, которые вносит в служебные свойства смазок поляризация смазываемой поверхности от внешнего источника, проводятся Шором и Лапиным [177—179]. Показано, в частности, что в среде неводных электролитов, каковыми являются масла с присадками, зависимость интенсивности изнашивания металла от величины и знака потенциала имеет характер электрокапиллярной кривой, потенциал нулевого заряда которой связан с работой выхода электрона. Этот результат, как, впрочем, и вытекающие из него выводы авторов, имеет прямое отношение к содержанию предыдущей главы. Практическим следствием подобных исследований явилась возможность управлять механизмом электрохимического взаимодействия технических масел с деталями узлов трения. Если к тому же учесть, что путем наложения электрического поля можно смещать динамическое равновесие скоростей образования и разрушения сервовитной пленки, нарушать или создавать адгезионный контакт, изменять структурно-вязкое состояние коллективов полярных молекул, дисперсных систем и т. д., то универсальность такого приема не вызывает никакого сомнения.

В одной из указанных работ [177] авторы попытались установить причины электризации углеводородной жидкости, которая вызывалась трением о вращающийся металлический электрод и степень которой зависела от наличия в жидкости полярных компонент, мицеллообразующих примесей и т. п. Установив, что величина и знак электростатического заряда жидкостей с неодинаково выраженной полярностью соответствуют расположению металлов в ряд по возрастающей работе выхода, авторы высказали предположение о двух основных механизмах электризации, состоящих в накоплении ионов противоположного знака: отрица-

тельных — за счет захвата молекулами жидкости испускаемых металлом экзоелектронов и положительных — при ионизации молекул трением в условиях турбулентного движения приповерхностного слоя смазки. Противоборством указанных механизмов и определяется степень электризации в каждом из конкретных случаев.

Такая точка зрения, даже если она и кажется правдоподобной, требует дополнительного выяснения вопроса о природе электронной эмиссии, возникающей с поверхности электрода [164, 12].

Если следовать работе [180], то электризация зависит от наличия в системе дисперсной фазы, которая может состоять из пузырьков, растворенных в масле при сильном сжатии и выделяющихся при внезапном снижении давления. Заряды, появляющиеся вследствие разрыва ранее находившейся под нагрузкой и насыщенной газом масляной пленки, разряжаются, как только разность потенциалов на слое превысит его электрическую прочность. Разряды, если они протекают в искровой форме, вызывают узлокализированное повышение температуры и точечное плавление металла.

Согласно [181], пробой жидкого диэлектрика заключается в испарении и ионизации диэлектрика, в образовании отштурованного канала сквозной проводимости и в практически мгновенной передаче при помощи этого канала энергии, запасенной в системе. Бризантность «электрического взрыва» усиливается побочными явлениями типа гидравлического удара, обусловленными чрезвычайно малой сжимаемостью жидкости по сравнению с газовой средой.

Экспериментальные данные, полученные Райко и Павловым [182], свидетельствуют о том, что электрические разряды в тонких смазочных слоях развиваются в газовых пузырьках, в то время как масло лишь стабилизирует разряд, непосредственно в нем не участвуя.

Чтобы предотвратить накопление электрических зарядов в маслах, приводящее, кстати, к их быстрому окислению, Саломон предложил уменьшать величину омического сопротивления смазки, добавляя в нее электропроводный материал. Как установлено недавно Венцелем с сотр. [183], «при малых сопротивлениях смазочной пленки имеют место так называемые «тихие» разряды... С повышением вязкости масла увеличивается сопротивление смазочной пленки, что вызывает накопление зарядов с последующим пробоем, сопровождающимся массопереносом, повышением локальных температур на микровыступах поверхностей трения и повышением износа». Очень важным результатом, о котором сообщается в этой работе, является снижение скорости изнашивания деталей (поршней, поршневых колец и цилиндровых гильз, вкладышей коленчатого вала и т. д.), достигнутое при стендовых промышленных испытаниях двигателей внутреннего сгорания путем искусственного замыкания электрической цепи между

сопряженными элементами трущихся пар с целью предотвращения разрядов в искровой форме.

В рамках настоящей главы автор не имеет возможности остановиться на близких по направленности работах, посвященных изучению электризации пластичных дисперсных систем, полверженных электрокинетическим явлениям<sup>1</sup>, на изложении новых методов, которые позволяют следить за превращениями в углеводородных жидкостях, происходящими на молекулярном уровне<sup>2</sup>, и др.

Оставляя, по существу, незатронутыми многие из вопросов, касающихся электрических свойств граничных смазочных слоев, мы сообщим лишь о наиболее интересных, на наш взгляд, результатах экспериментальных работ и некоторых результатах исследований самого автора. При этом хемосорбционные процессы, сопровождающие процессы физической адсорбции, рассматриваются в большинстве обсуждаемых случаев как побочные.

## § 2. Электрические свойства граничных слоев, образованных ценными молекулами

Представление об электрических свойствах граничных смазочных слоев естественно связывать с полярностью ценных молекул. Ориентированная адсорбция таких молекул с явно выраженными активными центрами изменяет физические свойства углеводородов, находящихся в граничных условиях. При формировании монослоя нерастворимого алифатического соединения (например, жирной кислоты) преобладает однозначная ориентация дипольных моментов относительно поверхности твердого тела. Смазочная пленка приобретает свойства двойного электрического слоя, о чем свидетельствует асимметрия ее электропроводности (детекторный эффект Фивега) [187] и скачок межфазного потенциала (порядка единиц и десятков милливольт) [188, 189].

Принципиальное значение для развития исследований в этой области имеют результаты, которые были получены благодаря применению так называемого метода сдувания [190] к граничным пленкам углеводородных жидкостей на металлах [191, 192].

Оказалось, что по мере приближения к металлической подложке вплоть до достижения ее поверхности вязкость жидкости не меняется, если она свободна от полярных компонент. Когда же в такой жидкости (авторами использовалось тщательно очищенное вазелиновое масло) присутствуют даже очень малые количества полярных молекул (например, жирных кислот или эфиров), то при толщине слоя около  $10^{-6}$  см вязкость скачком изменяется, а затем снова остается постоянной. Другими словами,

<sup>1</sup> См., например, [184, 185].

<sup>2</sup> О результатах применения одного из таких методов — ядерного магнитного резонанса — сообщается в работе [186].



на поверхности металла появляется граничный слой (или слои) с особой вязкостью. Поскольку граница раздела с объемной фазой выражена у таких слоев довольно четко, их стали называть граничными фазами.

Хотя наблюдавшиеся изменения вязкости были невелики (порядок величины оставался тем же, что и для объемной фазы), сам факт скачкообразного изменения одного из свойств жидкости, находящейся в граничном состоянии, весьма важен [4]: он служит «указанием на особую ориентированную молекулярную структуру в граничных фазах, резко отличную от беспорядочного расположения молекул в объеме жидкости. Без такого предположения невозможно объяснить одновременно постоянство вязкости в граничных фазах и скачкообразный переход к вязкости объемной фазы».

Опираясь на указанную интерпретацию образования граничного слоя как фазового превращения, происходящего под влиянием поверхности твердого тела, к очень интересному выводу пришел Снитковский [193]: «Близкий порядок в жидкостях, склонность к образованию в них вблизи точки фазового перехода макфлуктуаций плотностей, или областей одинаково ориентированных спинов, позволяют предположить, что граничная фаза должна иметь структуру, состоящую из отдельных объемов, внутри которых собственные или наведенные дипольные моменты упорядочены. Такое строение подпадает под понятие «доменная структура» и, как известно, свойственно сегнето или антисегнетоэлектрикам, обладающим высоким значением диэлектрической проницаемости». И далее: «Фазовое превращение, сопровождающееся увеличением диэлектрической проницаемости, является наиболее энергетически выгодным. Это следует из рассмотрения задачи о нахождении полной свободной энергии при внесении диэлектрического тела в поле, из которой исключена свободная энергия поля во всем пространстве в отсутствие тела, рассмотренной Ландау и Лившицем».

Экспериментальное исследование кулоновольтных характеристик граничных слоев, выделившихся из углеводородных жидкостей на металлических подложках, показало [193], что они имеют вид двойных или одинарных петель гистерезиса, что и считается подтверждением доменной структуры граничных фаз. Рассчитанные по этим характеристикам значения диэлектрической проницаемости оказались довольно высокими (~230 для олеиновой кислоты при толщине слоя 2 мкм). Как отмечает автор, «увеличение диэлектрической проницаемости при фазовом переходе свидетельствует о том, что этот переход инициируется электрическим полем».

По поводу изложенных соображений хотелось бы заметить следующее.

Представление о несамостоятельном фазовом превращении под влиянием приповерхностного поля подложки не дает основа-

ний переходить к представлениям о доменной структуре граничных фаз именно из-за их необычного, граничного состояния. Автор считает, например, что в рассматриваемых условиях за области спонтанной поляризации — «собственные» домены — могли быть приняты области вынужденной поляризации — «наведенные» домены (если только вообще их целесообразно называть доменами!), которые появляются в неоднородном электрическом поле поликристаллической шероховатой поверхности в результате столь же беспорядочной ориентации осей полярных молекул, адсорбированных на кристаллитах, как и расположение кристаллографических осей самих кристаллитов ([32], с. 225). Другими словами, электрический момент пакета одинаково ориентированных дипольных систем и является его отличительным признаком, характеризующим как бы появление наведенного в поле домена. Совокупность таких пакетов как своеобразных жидких кристаллитов и определяет поликристаллическое строение граничных фаз. Вопрос о том, постепенно ли уменьшаются углы между осями молекулярных кристаллитов по мере адсорбционного заполнения граничного пространства [32] или имеют место обрывы ориентации молекулярной структуры на определенном расстоянии от металлической поверхности [4], остается пока открытым.

Ясно, что при циклических изменениях внешнего поля перестройка молекулярной структуры граничного слоя будет сохранять следы запаздывания (особенно на высоких частотах), что и стало предметом изучения с помощью гистерезисных петель. Что касается изменений диэлектрической константы веществ (углеводородов парафинового ряда, жирных кислот, спиртов, эфиров и др.), то значение ее для граничных слоев жирных кислот, например, может оказаться необычно низким [32]. Это говорит как раз об энергетически невыгодных для углеводородной жидкости условиях граничного существования.

Все сказанное не означает, однако, что переход приповерхностного слоя жидкости в мезоморфное состояние не сопровождается приобретением граничной фазой свойств сегнетоэлектрика или антисегнетоэлектрика (диэлектрическая восприимчивость последнего и может, кстати, иметь ничтожно малую величину, что не учитывается в работе [193]). Автор хотел бы лишь снова подчеркнуть отличие граничной сегнетоэлектрической фазы от обычного ферроэлектрика<sup>1</sup>. Оно заключается в том, что не только появление, но и последующее существование такой фазы требует, на наш взгляд, соседства поликристаллической твердой поверхности.

Нелинейность вольтамперных характеристик (ВАХ) граничных фаз проверялась в условиях, исключающих влияние продуктов хемосорбции и значительных по толщине пленок окислов [194]. Опыты проводились с электродами, покрытыми гальвани-

<sup>1</sup> Кристаллического вещества, у которого отсутствует центр симметрии.

ческим путем золотом. В качестве смазки использовались одноосновные карбоновые кислоты насыщенного ряда — пропионовая, масляная, капроновая, эвгеновая и каприловая, а также высшая непредельная кислота с одной двойной связью — олеиновая. Было показано, что полупроводниковые свойства граничных слоев непосредственно связаны с их специфическим состоянием, причем наряду с шоттковским в них имеет место и френкелевский механизм проводимости.

Наличие участка насыщения у нелинейных ВАХ, снятых при переменном напряжении, говорило о возможности получения статических характеристик S-типа, а значит, о вероятности переключений в граничных слоях углеводородных жидкостей под действием внешних полей [195].

Такие переключения из низкоомного состояния в высокоомное и обратно, когда электрическое сопротивление слоев изменялось на 4—7 порядков, были обнаружены Юрьевым [196]. Они вызывались переменными, постоянными и импульсными полями и происходили при пороговых для данной толщины слоя значениях напряжений. В опытах с вазелиновым маслом и олеиновой кислотой, например, переключения в слоях толщиной 4 мкм наблюдались при напряжениях 2,5 и 1,9 В соответственно. Исследуя характер переключений при трении, которые в зависимости от толщины граничного слоя делали его либо запирающим, либо проводящим, автор указал на особую роль в этих процессах контактных электрических полей, а также полей, обусловленных накоплением статических зарядов или подключением внешних источников. Им также рассмотрен вопрос о влиянии параметров внешней цепи пары трения на электрические свойства смазочного слоя, от чего может существенно зависеть работа фрикционной системы.

В связи со сказанным нельзя не обратить внимания на одно очень важное обстоятельство. Дело в том, что реакция электрического сопротивления граничного слоя даже на весьма слабое изменение поля является как раз характерной для жидкокристаллических веществ, свойства которых могут резко изменяться при незначительных изменениях внешних условий. Широко известна, например, структурно-чувствительная зависимость цвета некоторых жидких кристаллов от температуры или присутствия в атмосфере химических веществ ничтожно малой концентрации.

Обратимся к другим интересным фактам, которые показывают, что «переключателем» электрического состояния смазочной пленки может быть ее деформация, а точнее — поле внутренних напряжений.

В контрольных опытах по проверке сплошности стопы слоев при определении их упругих констант [32]<sup>1</sup> была обнаружена

<sup>1</sup> Измерения производились Л. В. Пановой (Кочлаковой). Метод стопы слоев, полученный в иностранной литературе название «ахматовский сэндвич», подробно излагается в указанной монографии.

зависимость электропроводности граничных слоев от давления, что, по мнению Ахматова, объясняется перестройкой молекулярной структуры вещества под влиянием сжимающего усилия. Значительное изменение электрического сопротивления смазанного контакта при деформировании смазочной пленки между обкатываемыми поверхностями роликов зафиксировали Мигаль и Павлов [197].

Рассмотрим теперь кривую, воспроизводящую характер изменения интегральной э.д.с.  $\xi_j$  при трении углеродистых сталей в жидком парафине (рис. 72) [26]. Известно, что благодаря пол-

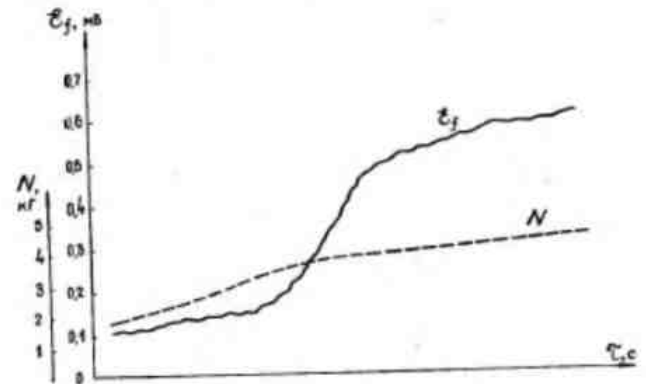


Рис. 72. Осциллограмма разности потенциалов между образцами из углеродистой стали при скольжении в среде парафино-кафленового минерального масла ( $v=3,5$  м/с)

ной внутренней компенсации электрических моментов атомных связей в метиленовых и метильных группах молекулы парафина бездипольны. Отсюда вытекает, что  $\xi_j=0$  при совершенной граничной смазке и  $\xi_j \rightarrow \xi_i \neq 0$ , когда на поверхности раздела фаз имеет место прямой металлический контакт. Казалось бы, даже в случае неполярных углеводородов регистрация величины интегральной э.д.с. позволяет контролировать переход от чисто граничного трения к смешанному режиму скольжения. Записи, однако, наводят на мысль о том, что с увеличением нагрузки  $N$  на эпителии появляется дополнительный скачок потенциала, который может быть связан с вынужденной поляризацией нейтральных молекул парафина и их ориентацией в межфазном граничном поле. Как отмечает Ахматов [32], при сжатии метиленовой цепи в ней возникает результирующий электрический момент деформационного происхождения.

Все это вместе взятое согласуется с выводами об аналогиях в изменении молекулярной структуры граничного слоя под влиянием механических деформаций и электрических полей (по Френкелю), вынуждая поднять вопрос о необходимости исследования механического гистерезиса наряду с электрическим.

Исключительное значение работ по изучению условий, благоприятных для формирования на трущихся поверхностях упорядоченных структур с минимальной поверхностной энергией, стало особенно очевидным, когда вслед за явлением сверхлегкого скольжения, обнаруженным Гарди [198] и наблюдавшимся Ахматовым и Пановой [32], было открыто явление сверхнизкого трения при интенсивном облучении поверхности твердого тела потоком ускоренных частиц [199].

### § 3. Влияние размера цепных молекул на смазочные свойства жидкостей

Путем измерений проводимости смазанного фрикционного контакта Луни [200] исследовала несущую способность граничных слоев масел. Способность смазочной пленки разделять трущиеся поверхности оценивалась по частоте и скважности состояний, отвечающих либо присутствию точечных металлических контактов, либо их отсутствию при возвратно-поступательном движении стального шара по плоскому контртелу (сплавы медные и алюминиевые, на основе олова и свинца, чугуны). О характере информации, которую получал Луни с экрана осциллографа, можно судить по картинкам, показанным на рис. 73, где возрастающая

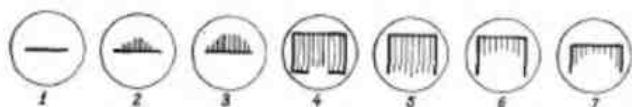


Рис. 73. Картинки, наблюдаемые на экране осциллографа при оценке несущей способности граничных слоев масел (по Б. Луни)

нумерация соответствует переходу от «полного металлического контакта» к взаимодействию через редко прорываемый смазочный слой.

В результате была сделан вывод о существенном влиянии на несущую способность пленок природы тех твердотельных подложек, на которых они формируются. Согласно [200], «консистенция приповерхностного слоя» совсем иная, чем консистенция масла в объеме; такие слои имеют толщину  $\sim 1000 \text{ \AA}$ ; при удачно подобранной комбинации *масло — металл* они могут полностью разделять трущиеся поверхности, если даже скольжение осу-

ществляется при весьма низких скоростях и сравнительно высоких удельных нагрузках, достигающих, например, для мягких белых металлов до  $1500 \text{ кг/см}^2$ .

Аналогичным описанному методом регистрации числа и частоты следования электрических сигналов — импульсов, появляющихся при микропрорывах граничного смазочного слоя, авторами работы [201] оценивались сила трения и величина износа элементов, составляющих фрикционную пару.

К сожалению, и первое, и второе исследования проводились со сложными по составу смазками, тогда как для изучения явлений на молекулярном уровне необходимо пользоваться химически индивидуальными веществами, а также смесями двух или, скажем, трех компонент, «биография» молекул которых нам хорошо известна.

Кроме того, общим и, вероятно, неизбежным при существующей технике физического эксперимента недостатком указанных работ являются такие условия их проведения, в которых при определении механической прочности смазочных слоев приходится считаться с их диэлектрической прочностью и возможными в них пороговыми переключениями, о чем говорилось выше.

Как мы увидим в дальнейшем, этот недостаток автоматически устраняется в методе, который был предложен автором для определения несущей способности граничных фаз, выделившихся из слоя электролитической смазки. Чтобы вопрос стал еще более понятным, сделаем несколько предварительных замечаний.

Помимо несущей способности смазочной пленки известны: ее экранирующая способность, характеризующая степень искажения и гашения остаточного поля твердой фазы, уже покрытой экранирующим слоем окисла [32]; смазывающая способность жидкости, одна из последних дефиниций которой дается как способность «к адсорбции и хемсорбции на поверхности твердых тел» [202]; проникающая способность среды (гл. IV, § 4). Совершенно очевидно, что подобно, например, маслянистости жидкости (Schlupfrigkeit, Oiliness, Onctuosité) каждая из названных способностей, совокупным проявлением которых и является антифрикционный эффект, представляет собой характеристику комплексную, зависящую не только от структуры и свойств молекул смазочного состава, но и от таких факторов, как адсорбционный потенциал и химическая активность трущихся поверхностей, градиент температурного и напряженности электрического полей в щелевом межфазном пространстве, особые свойства смазочного слоя, которые он приобретает в граничном состоянии, и т. д. Поэтому для сравнения смазочной функции жидкостей обычно используют такой параметр, допустим коэффициент трения, на величине которого отражаются любые изменения, происходящие в трехфазной граничной системе.

С увеличением молекулярного веса смазки (длины цепных полярных молекул) трение, как это впервые установил Гарди

[203], убывает. В пределах одного и того же гомологического ряда зависимость коэффициента трения  $\mu$  от молекулярного веса  $M$  является линейной:

$$\mu = a - bM. \quad (3.1)$$

Начальная ордината  $a$  служит мерой фрикционного взаимодействия чистых поверхностей; угловой коэффициент  $b$  показывает то изменение трения, которое приходится на каждую метиленовую группу данной химической серии (нормальных парафинов, жирных кислот, спиртов и т. п.). Результаты экспериментов Гарди были подтверждены исследованиями Боудена и Тейбора [173], а несколько позже работой Зисмана [204].

Следует отметить, что формула (3.1) остается справедливой лишь до какого-то определенного члена гомологического ряда; после него величина  $\mu$  не зависит от молекулярного веса. Выявить гомолог, начиная с которого все остальные члены серии обладают одинаковой антифрикционной активностью, оказалось не так просто. Для ряда одноосновных карбоновых кислот, например, таким «критическим» гомологом являются: 12-й — по Гарди, 5-й — по Боудену, 14-й — по Зисману.

Как показал Фуке [205], явление закономерного изменения граничного трения с изменением структуры молекул наблюдается и для растворов жирных кислот в различных растворителях. Автор пришел к заключению, что увеличение смазочной способности изученных им систем обусловлено влиянием длины углеродной цепи молекул на величину расклинивающего давления тонких слоев жидкостей (по Дерягину).

По мнению Ахматова, результаты, полученные Гарди, Боуденом, Зисманом и Фуком, «могут быть объяснены с точки зрения гипотезы остаточного поля твердых фаз» [32].

Если углеводороды, спирты и амины проявляют склонность к физической адсорбции на поверхности металла, то жирные кислоты могут реагировать с ней химически с образованием как монослоя металлического мыла, так и вязкого слоя значительной толщины, который ведет себя подобно эластогидродинамической пленке [206]. В химической теории граничного трения<sup>1</sup> отмечается, что реакции омыления жирных кислот происходят с участием окислов, но не уделяется достаточного внимания тому факту, что окислы сами по себе обуславливают сильный экранирующий эффект, снижая тем самым коэффициент трения [32].

Способность углеводородов к хемотренности на ювенильной поверхности металла установлена сравнительно недавно [208]; при этом оказалось, что алкен, т. е. углеводород, содержащий двойную C=C связь, является гораздо более эффективной смазкой, чем соответствующий ему алкан.

Предсказать заранее, каким будет совокупный продукт про-

цессов, протекающих в трехфазной системе (термический распад молекул, катализ, прямые химические реакции и т. п.), удается далеко не всегда. Однако уже в нескольких работах наблюдалось образование этого продукта в виде полимероподобного осадка черного цвета<sup>1</sup>.

После изложенного становится ясным, что область граничных явлений, характерных для трения металлов при наличии органической смазки, остается малоизученной<sup>2</sup>. Между тем метод, описанный в [16—19], дает возможность получить информацию о кинетике формирования тонких смазочных пленок, находящихся под двусторонним влиянием металлических фаз, и оценить их несущую способность.

Идея метода очень проста: она сводится к регистрации и статистическому учету изменений электродвижущей силы  $\mathcal{E}$ , трех-

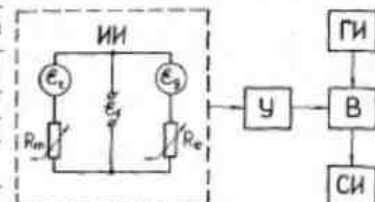


Рис. 74. Блок-схема установки для статистической оценки смазочных свойств жидкостей:

ИИ — источник информации; У — усилитель; Г — генератор импульсов; СИ — счетчик импульсов.

фазной фрикционной системы (рис. 74). В присутствии ионосодержащей среды ( $R_e$  — сопротивление электролита) такая система представляет собой гальванический элемент, при коротком замыкании которого гальвано-э.д.с.  $\mathcal{E}_g$  становится как бы отключенной от внешней цепи. Система продолжает быть источником электродвижущей силы в качестве естественного термоэлемента, однако, как правило, абсолютная величина термо-э.д.с.  $|\mathcal{E}_t| \ll |\mathcal{E}_g|$ . Скачки э.д.с., соответствующие переходам  $\mathcal{E}_g \rightleftharpoons 0$  (замыкание и размыкание контакта) или  $\mathcal{E}_g \rightleftharpoons \mathcal{E}_t$  (то же самое при скольжении), являются своего рода командами, благодаря которым источник информации фактически сам управляет каналом связи между генератором и счетчиком импульсов. Пусть, например, в случае непосредственного соприкосновения металлов, когда общее сопротивление дискретного контакта  $R_m \rightarrow 0$  и  $\mathcal{E}_t \approx \mathcal{E}_g$ , пороговый вентиль заперт. Это положение не изменится до тех пор, пока в слое электролитической смазки присутствует хотя бы один контактирующий островок. Но едва только подобные островки исчезнут полностью, как усиленный сигнал, соответствующий значению  $\mathcal{E}_t = \mathcal{E}_g$ , отперет пороговый вентиль, после чего импульсы, вырабатываемые генератором, начнут поступать

<sup>1</sup> См., например, [209, 210].

<sup>2</sup> Читатель, который захочет более подробно ознакомиться с состоянием исследований в этой области, может обратиться к обзорному докладу Д. Тейбора на Международной конференции по смазке и износу (Лондон, сентябрь 1967 г.) [211].

<sup>3</sup> Разработана Ф. П. Боуденом с соавторами [207, 173].

в счетчик. По заполнению последнего в течение одинаковых интервалов времени ( $\tau_c$ ) определяется суммарная продолжительность действия  $\mathcal{E}_g$  для каждого из исследуемых составов ( $\tau_c$ ). Само собой разумеется, что управляющие сигнал-команды, поступающие в пороговый вентиль, можно легко поменять ролями. Тогда заполнение счетчика будет соответствовать времени, в течение которого действовала  $\mathcal{E}_f$  ( $\tau_m = \tau_c - \tau_e$ ). Значения  $\tau_e$  и  $\tau_m$ , полученные в результате автоматизированного учета скачкообразных изменений  $\mathcal{E}_f$ , и используются для сравнения различных смазок по их защитной функции при соблюдении полной тождественности начальных условий опыта. Согласно диаграмме, пока-

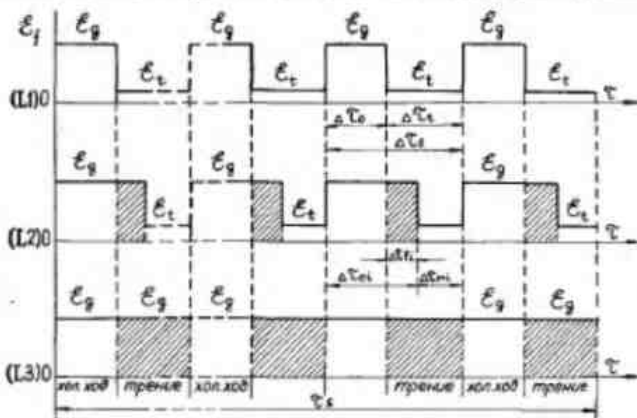


Рис. 75. Временная диаграмма интегральной э.д.с. при циклическом контактировании трущихся металлов в электропроводных средах (L1, L2 и L3):

$\tau_c$  — полное время эксперимента для каждой смазочной среды. Промежуток времени для  $i$ -го цикла контактирования;  $\Delta\tau_c$  — полное время цикла;  $\Delta\tau_e$  — время разомкнутого состояния контакта на воздухе (холостой ход);  $\Delta\tau_f$  — время замкнутого состояния контакта на воздухе (трение);  $\Delta\tau_{ei}$  — время, в течение которого поверхность разделенна слоем электролита;  $\Delta\tau_{mi}$  — время трения металлического контакта;  $\Delta\tau_{ii}$  — время, в течение которого электролит выполняет смазочную функцию

занной на рис. 75, например, из трех пробных смазок L1, L2 и L3 лишь последняя дает возможность осуществить процесс в условиях, обеспечивающих полное предотвращение металлического контакта в течение всего интервала  $\tau_c$ . Смазка L2 выполняет защитную функцию намного слабее, а нарушение сплошности пленки, образованной смазкой L1, происходит вообще без какого-либо «запаздывания» (как на воздухе).

Несущая способность смазочного слоя оценивается следующим образом:

$$\delta = \frac{\tau_e}{\tau_f}, \quad (3.2)$$

где  $\tau_e = \sum_{i=1}^N \Delta\tau_{ei}$ ;  $\tau_f = N\Delta\tau_{fi}$   $N$  — число циклов

контактирования. Если выбран интервал  $\tau_c = N\Delta\tau_c$  и по показаниям счетчика найдены  $\tau_e = \sum_{i=1}^N \Delta\tau_{ei}$  и  $\tau_0 = N\Delta\tau_0$  (постоянная составляющая), то

$$\delta = \frac{\tau_e - \tau_0}{\tau_c - \tau_0}, \quad (3.3)$$

при известных  $\tau_m = \sum_{i=1}^N \Delta\tau_{mi}$  и  $\tau_f$  имеем

$$\delta = 1 - \frac{\tau_m}{\tau_f}. \quad (3.4)$$

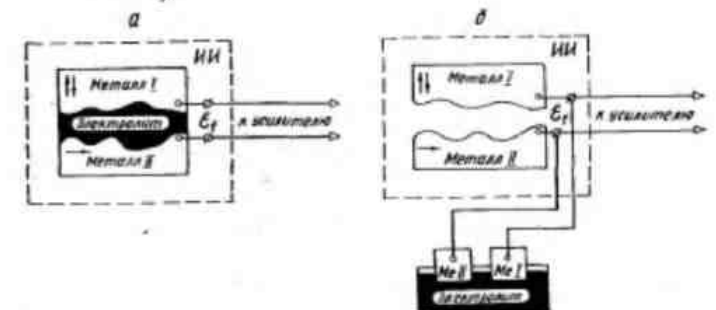


Рис. 76. Источник информации в основном (а) и вспомогательном (б) состояниях (стрелками показаны возможные направления движения образцов)

Определение значений  $\tau_e$  (или  $\tau_m$ ) и  $\tau_0$  (или  $\tau_f$ ) иллюстрируется схемами, приведенными на рис. 76, а и 76, б соответственно.

В качестве объекта исследования были выбраны одномолярные водные растворы натриевых солей двухосновных карбоновых кислот. Согласно табл. 9, относительная стабильность значений э.д.с. у гальванозащитных элементов с катодами из железа, никеля и цинка различна. Она выше для пары Cu—Fe, которая и была использована в первой серии опытов. Работа адгезии подсчитывалась по уравнению Юнга—Дюпрё:

$$A = \gamma_{LA} (1 + \cos \theta), \quad (3.5)$$

где  $\gamma_{LA}$  — поверхностное натяжение смазки;  $\theta$  — краевой угол.

Таблица 9  
Данные об одномерных растворах солей, относящихся к гомологическому ряду  $(\text{CH}_2)_n(\text{COONa})_2$

№ п/п	Раствор электролита	Молекулярный вес $M$	Вязкость $\eta$ , П (18-20°C)	Работа электр. А, час/см <sup>2</sup>					Гальванич. ЭД, мВ			
				Fe <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cd(+) Fe(-)	Cd(+) Ni(-)	Cd(+) Zn(-)		
1	Оксидат натрия $\text{NaOOC}-\text{COONa}$	124	90,8	143	124	146	142	172 →	35 ↓	470 →		
2	Малеат натрия $\text{NaOOCCH}_2\text{COONa}$	148	96,4	100	140	171	165	475	56 ↓	924 →		
3	Сукцинат натрия $\text{NaOOC}(\text{CH}_2)_2\text{COONa}$	162	101,9	98	79	122	104	508	108 →	990		
4	Глутарат натрия $\text{NaOOC}(\text{CH}_2)_3\text{COONa}$	176	107,5	79	79	96	81	505	83 ↓	988 →		
5	Адипонат натрия $\text{NaOOC}(\text{CH}_2)_4\text{COONa}$	190	113,1	141	118	152	150	498 →	97 ↓	994 ↓		
6	Азелапат натрия $\text{NaOOC}(\text{CH}_2)_5\text{COONa}$	232	123,6	77	81	85	73	195 ↓	80 ↓	819 ↓		
7	Сейбапат натрия $\text{NaOOC}(\text{CH}_2)_6\text{COONa}$	246	125,3	108	95	110	105	186 ↓	86 ↓	905 ↓		

\* Стрелками показано направление (+) и скорости (↓) изменения ЭД.

Следует заметить, однако, что по отношению к выбранным системам такой расчет отличается известным произволом.

Общий вид узла трения схематически представлен на рис. 77. Прерывистый скользящий контакт между электродами 1 и 2 осуществлялся здесь благодаря эксцентрику 3, который периодически нажимал на упорный винт 4, заставляя тем самым образец 2 то выходить из соприкосновения с образцом 1, то снова в него входить по заданному циклу. Эксцентриковый диск имел ту же самую скорость вращения (60 об/мин), что и образец 1. Поэтому полное время цикла  $\Delta t_c$  соответствовало времени одного оборота образца 1 и составляло 1 с. Величина эксцентриситета выбиралась таким образом, чтобы интервалы времени  $\Delta t_0$  и  $\Delta t_1$  были примерно одинаковыми. Максимальный зазор между образцами регулировался упорным винтом; он не превышал 0,5 мм. Усилие, с которым образцы прижимались друг к другу в процессе скольжения ( $\sim 9\text{Г}$ ) создавалось с помощью рычага 5 и шти с грузом, перекинутой через блок 6. Оба электрода были надежно изолированы от массы. Соединение вращающегося образца с внешней электрической цепью осуществлялось посредством ртутного контакта 7. Смазочная жидкость поступала в зону трения по резиновому шлангу со стеклянным наконечником 8.

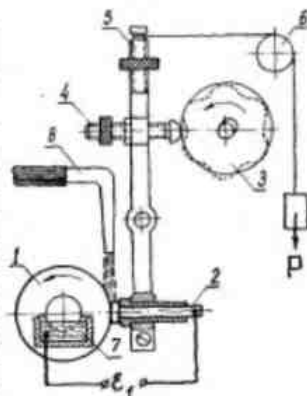


Рис. 77. Схематическое изображение узла трения

Для подготовки поверхностей — удаления фазовых окислов, масел и жиров — применялись мелкозернистая абразивная шкурка и ацетон.

Наряду с опытами, в которых экранирование металлических поверхностей, склонных к химическим реакциям, происходило за счет образования на них пленок мыла, была проведена оценка защитных свойств адсорбционных слоев, заключенных между материалами с хорошей коррозионной стойкостью. В качестве таких материалов были выбраны алюминиевая бронза и хромоникельтитановая сталь, обладающая особенно высокой стойкостью в окисляющих агрессивных средах. При этом оказалось, что одним из существенных обстоятельств, благоприятствующих выведению различия в способности ван-дер-ваальсовых пленок препятствовать восстановлению контакта, является такой характер колебательного движения образца 2, когда хотя бы кратко-

времени обеспечивается свобода его нормальных перемещений. Вот почему перед проведением второй серии опытов эксцентриковый диск узла трения был заменен звездочкой, показанной на рис. 77 пунктиром.

Кривые изменения критерия несущей способности со временем для случая явно выраженных химических реакций смазок с поверхностью меди приведены на рис. 78. Эти кривые, особенно 6 и 7, имеют ориентировочный характер, так как быстрая поляризация электродов при коротких замыканиях гальваноземента приводит к убыванию его электродвижущей силы, что в какой-то степени отразилось на соотношении между  $\tau_1$  и  $\tau_{0.5}$ . Тем не менее

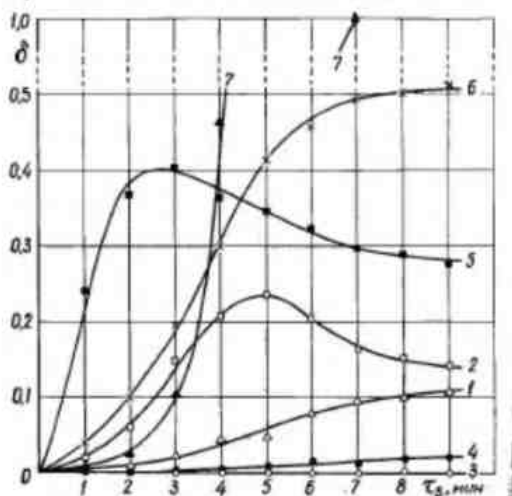
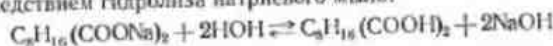


Рис. 78. Кривые  $\delta=f(\tau)$  для пары Си (дисковый образец) — Fe (цилиндрический образец) при контактном взаимодействии в 1M р-рах натриевых солей двухосновных карбоновых кислот:

1 — оливиновой; 2 — малеиновой; 3 — янтарной; 4 — глутаровой; 5 — аллиловой; 6 — олеиновой; 7 — себациновой

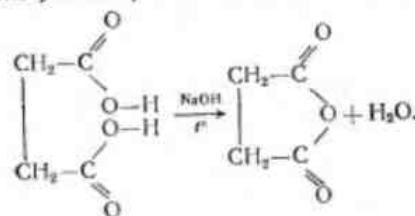
с помощью таких кривых можно проследить за кинетикой процессов, протекающих при контактном взаимодействии металлов в присутствии ионсодержащих сред. Согласно рис. 78, например, использование в качестве смазочных жидкостей растворов солей, относящихся к одному и тому же гомологическому ряду  $(CH_2)_n(COONa)_2$ , обнаруживает существенное различие в кинетике химических реакций, протекающих с их участием. Чем крупнее органические молекулы, тем выше способность сформированной из них пленки предотвращать металлический контакт поверхностей.

При смазке раствором себацината натрия (кривая 7) наблюдалось полное исчезновение контактных микропадов с низкоомным сопротивлением после того, как узел трения работал в течение семи минут. Этот результат мог быть прямым следствием гидролиза натриевого мыла:



и последующего омыления себациновой кислоты при химических реакциях с металлами, составляющими пару трения. На смазочный эффект в подобных случаях влияют все сорта металлических мылов, образующих при растворении в воде смектическую разновидность жидкокристаллического состояния. Отметим, кстати, что водный раствор мылов высших жирных кислот, имеющий щелочную реакцию, оказался благоприятной средой и для реализации эффекта избирательного переноса [212].

Указанная выше закономерность, однако, не является общей для всех солей дикарбоновых кислот. Она не относится к растворам сукцината или глутарата натрия, при использовании которых  $\delta=0$  (кривая 3) или  $\delta < 0.05$  (кривая 4). Эти аномально низкие значения  $\delta$  связаны, как естественно предположить, с превращением янтарной и глутаровой кислот в циклические (внутренние) ангидриды за счет отщепления элементов воды. Особенно легко такое отщепление происходит при нагревании янтарной кислоты, молекулы которой имеют четыре атома углерода:



В опытах с янтарной кислотой автор наблюдал лишь слабое потускнение медной поверхности, в то время как применение малеиновой и адипиновой кислот сопровождалось явным распадом ценных молекул с образованием сажистых отложений. Последние могли быть свободно удалены с поверхности твердого тела по мере их накопления, чем, вероятно, и объясняется снижение  $\delta$  (максимума на кривых 2 и 5) после почернения дорожки трения на медном образце.

В серии экспериментов, проводившихся с химически активными слагаемыми и меньшим набором тех же кислот, был получен результат (рис. 79), непосредственно перекликающийся с результатами опытов Гарди. Оказалось, что в условиях преобладания

адсорбции, осуществляемой силами Ван дер Ваальса, несущая способность граничного слоя является линейно возрастающей функцией молекулярного веса  $M$  и соответственно размера цепных молекул:

$$\delta = kM, \quad (3,6)$$

Здесь  $k$  — константа, обратная предельному значению  $M$ , начиная с которого  $\delta=1$  (в нашем случае  $k=1/268$ ).

Важнейшая особенность этого результата состоит, как нам кажется, в том, что он отражает механическую прочность и смазочную функцию преимущественно ретикулярных структур, обра-

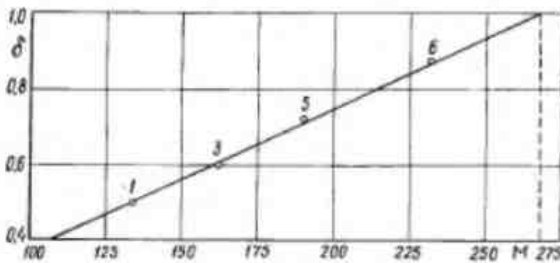


Рис. 78. Влияние молекулярного веса смазки на несущую способность граничного слоя при контактном взаимодействии пары хромоникельтитановая сталь (ХН18Н9Т) — алюминиевая бронза (БрАЖ9—4) (цифры 1, 3, 5, 6 соответствуют порядковым номерам растворов электродов в табл. 9)

зованных полярными молекулами с двумя активными центрами, расположенными на их концах. По значению коэффициента динамической вязкости (табл. 9) выбранные растворы отличаются не так сильно, как по значению  $\delta$ . Отсюда можно сделать вывод, что при некоторой свободе нормальных перемещений индентора влияние особо вязкого (граничного) состояния слоя на критерий его несущей способности проявляется со всей очевидностью.

С аналогичным узлом трения, но при значительно больших нагрузках и размерах образцов была также получена статистическая картина устойчивости смазочных пленок в условиях естественной вибрации элементов трущихся пар. Согласно опытным данным, несущая способность граничных слоев зависит от природы металлических тел, на которых они сформированы [19].

В заключение отметим, что описанный выше метод может быть при желании использован для экспресс-поиска оптимальных смазочных составов, удовлетворяющих определенным сочетаниям материалов контактирующих пар [18].

## Глава IV

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

#### § 1. Параметры термоэлектрической цепи инструмент — деталь — станок

Схема термоэлектрической цепи, размыкание внешнего контура которой является одним из способов повышения износостойкости металлорежущего инструмента, показана на рис. 80. К основным параметрам внешнего контура относятся<sup>1</sup>:

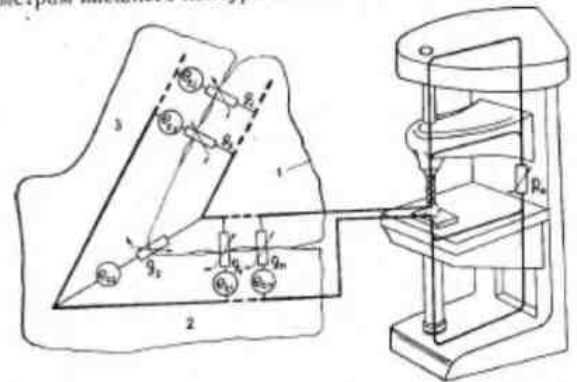


Рис. 80. Принципиальная схема термоэлектрической цепи инструмент — деталь — станок

а) действующая в нем термо-э.д.с., результирующее значение которой

$$\mathcal{E}_t = \frac{\sum_{i=1}^n e_i \mathcal{E}_i}{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i}, \quad (4.1)$$

где  $e_i$  — э.д.с. контура  $g_i - R_0$ ,  $g_i$  — проводимость  $i$ -й области стя-

<sup>1</sup> Аналогия приводимых ниже формул с некоторыми формулами § 3 гл. II вполне естественна; она подчеркивает их одинаковое физическое содержание.



гивания на поверхности раздела инструмента (1) со стружкой (3) и обрабатываемой деталью (2);

б) сопротивление зоны резания

$$R_m = 1 / \sum_{i=1}^n g_i \quad (4.7)$$

в) сопротивление  $R_0$ , включающее в себя сопротивление станка, а также сопротивления всех переходных контактов в местах крепления инструмента, технологической оснастки и детали. В дальнейшем мы будем называть это сопротивление просто сопротивлением станка, так как преимущественное влияние на  $R_0$  оказывают тип станка, степень его изношенности, состояние кинематической цепи и тому подобные факторы.

Величины  $\mathcal{E}_t$ ,  $R_m$  и  $R_0$  определяют силу термотока в интересующем нас внешнем контуре

$$I_t = \mathcal{E}_t / (R_m + R_0) \quad (4.8)$$

По данным Авакова, Адама, Фельдштейна и др. [213], величина  $\mathcal{E}_t$  при обработке сталей твердосплавными резами может достигать 15—20 мВ. На нее влияют «паразитные» термо-э.д.с., источниками которых являются трения сопряжения в кинематической цепи станка, места контакта режущего элемента с державкой, державки и обрабатываемой детали со станком и т. п. [214, 109].

Согласно [29], при сверлении труднообрабатываемых материалов инструментом из быстрорежущей стали величина  $\mathcal{E}_t$ , найденная методом компенсации, имеет порядок нескольких милливольт (рис. 81). Она зависит от режимов резания.

Для дальнейшего немаловажно отметить, что в работе Семко [215] показано сильное влияние на термо-э.д.с. характера термообработки инструмента. В ней также указывается на наличие инерционной точки у естественной термодпары *резец—стружка* в определенном диапазоне скоростей резания.

С использованием высокочувствительной измерительной аппаратуры и специальных экранирующих приспособлений для устранения внешних помех измерения омическо-

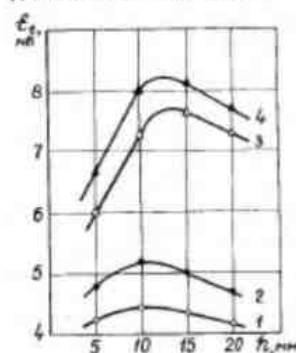


Рис. 81. Зависимость термо-э.д.с. внешнего контура от глубины сверления образцов из титанового сплава ВТ5 (кривые 3, 4) и нержавеющей стали ЭИ1654 (кривые 1, 2) (материал инструмента — быстрорежущая сталь Р18, толщина образцов 25 мм, диаметр сверла 10 мм). Режимы резания: 1— $v=4,4$  м/мин;  $s=0,11$  мм/об; 2— $v=4,4$  м/мин;  $s=0,36$  мм/об; 3— $v=4,4$  м/мин;  $s=0,15$  мм/об; 4— $v=6,6$  м/мин;  $s=0,16$  мм/об

го сопротивления зоны скользящего контакта при резании проводились Яковлевым [216]. Было установлено, что при фрезеровании и точении стали 30 твердосплавным инструментом из сплава Т15К6 в широком диапазоне скоростей резания, достигающих до 300 м/мин и выше, величина  $R_m$  изменяется в пределах  $\sim 0,001—0,0025$  Ом. Увеличение сопротивления контактной зоны при определенных значениях скорости вызывается, как полагает автор, образованием пленки окисла.

Примерно такая же величина  $R_m$  ( $\sim 0,0011—0,0021$  Ом) была найдена Рыжким и сотр. [217, 218] при снятии нагрузочных характеристик естественного источника термо-э.д.с., каковым является зона резания. Изучив характер изменения  $R_m$  в зависимости от режимов обработки точением стали 45 резцом с неплетачиваемыми пластинками из сплава Т15К6, авторы обратили внимание на то обстоятельство, что рост площади фактического контакта с увеличением подачи может в несколько раз опережать темп снижения сопротивления зоны резания. По их мнению, это опять-таки вызвано изменением толщины, структуры и фазового состава окисных пленок вслед за изменением температуры.

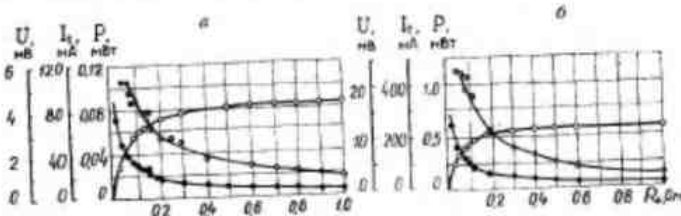


Рис. 82. Нагрузочные характеристики естественных термоэлементов, образующихся при точении стали 18Х2Н4ВА со скоростью резания  $v=50$  м/мин [220]. а—алмазный резец на Р18; б—из BK15

Особенно сильно влияние окисления на величину  $R_m$  сказывается в условиях прерывистого контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью. При фрезеровании, например, сопротивление зоны резания достигает нескольких ом или даже десятков ом в момент входа зуба фрезы соответственно из быстрорежущей стали или твердого сплава в заготовку и падает в момент выхода зуба фрезы из заготовки до 0,1—0,5 Ом (б. сталь) или до 0,7—1,8 Ом (тв. сплав) [219].

Согласно внешним характеристикам термоэлементов *резец—деталь*, приведенным на рис. 82, величина  $R_m$ , определяемая по наибольшему значению мощности, выделяемой в нагрузке, равна 0,03—0,045 Ом [220]. По данным Писарева [221], сопротивление зоны контакта сверла с деталью при обработке стали У8 инструментом из быстрорежущей стали Р18 составляет около 0,1 Ом;

исследование же пары сплав ВК15—сталь 18Х2Н4ВА при тчении и трении дает значения контактного сопротивления в пределах 0,035—0,07 Ом.

Для получения объективных данных о величине термотока при резании Бобровским [222, 109] измерялось сопротивление станков различных типов методом амперметра-вольтметра. Выяснилось, что в случае остановки станка величина  $R_0$  может, хотя и редко, составлять десятые доли ома, в то время как при работе станка под нагрузкой она «колеблется в широких пределах, достигая иногда нескольких сотен ом». Как правило, минимальное сопротивление станка находится в пределах 2—4 Ом, когда шпindelь вращается на малых оборотах.

Значения установившегося сопротивления, равные десяткам и сотням ом, были зафиксированы Барроу и Спенсером [223] при испытании станков токарной группы; оказалось, однако, что один из этих станков имел под нагрузкой сопротивление  $\sim 0,8$  Ом.

В свете высказанных ранее соображений о разрушительной функции термотока [1] вопрос о параметрах термоэлектрической

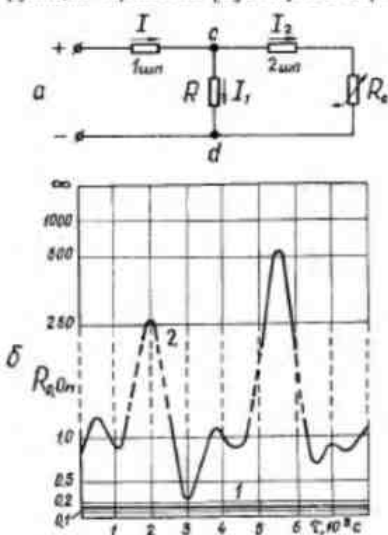


Рис. 83. Схема (а) записи сопротивления сплава ( $I=1$  мА—const,  $R=10$  Ом—const,  $U_{cd}=5-10$  мВ) и осциллограммы (б), дающие представление о величине и характере изменения  $R_0$ :

1—при неработающем станке; 2—в процессе сверления отверстий (Р16—В15,  $\sigma=4,4$  н/мм<sup>2</sup>,  $\lambda=0,15$  мк/об,  $\lambda=15$  мм)

цепи инструмент—деталь—станок побудил и автора с соотр. [29] прибегнуть к несложному эксперименту.

С целью измерения сопротивления станка была собрана специальная схема, фрагмент из которой приведен на рис. 83,а. Устойчивость схемы обеспечивалась путем автоматической стабилизации тока  $I$ , контролируемого первым шлейфом осциллографа типа Н102. Величина  $I$  была выбрана таким образом, чтобы при изменении сопротивления станка в пределах от 0 до  $\infty$  напряжение на постоянном сопротивлении  $R$  соответствовало значению термоэ. д. с. при обработке титанового сплава.

Запись  $R_0$  осуществлялась с помощью вто-

рого шлейфа, в цепь которого для предварительной калибровки включался магазин сопротивлений. Опыты проводились при неработающем станке и в процессе сверления отверстий. Инструмент и деталь были изолированы от станка в электрическом отношении. Для соединения токоподводящей шины с вращающимся шпинделем использовалась ртутная ванна.

Каждая из полученных осциллограмм давала возможность проследить за изменением  $R_0$  и в области больших и в области малых значений одновременно (рис. 83, б). Оказалось, что в случае неподвижного станка его сопротивление составляло 0,1—0,2 Ом, тогда как при резании величина  $R_0$  изменялась в интервале от десятых долей до сотен ом. Если, однако, принять во внимание инерционность шлейфного осциллографа и зависимость сопротивления контакта от приложенного к нему напряжения [117], то достоверность нижней границы  $R_0$  резонно подвергнуть сомнению. Замедление роста проводимости станка из-за вызванного этим ростом уменьшения напряжения на  $R_0 \rightarrow 0$  следует отнести к недостаткам описанной выше схемы.

Любопытно, что спад сопротивления станка до очень малых значений, который мог быть результатом переключений в тонких смазочных пленках или их продавливания, наблюдался сравнительно редко. С другой стороны, как мы уже убедились, сопротивление зоны резания имеет обычно порядок тысячных или сотых долей ома. Можно поэтому думать, что именно в моменты резкого спада  $R_0$ , т. е. при кратковременных бросках термотока, влияние последнего на износ инструмента особенно велико. И если нет оснований говорить о длительном протекании во внешнем контуре сравнительно сильного термоэлектрического тока, то по отношению к его импульсным мгновенным значениям такой вывод а priori ошибочен.

Обратимся теперь к данным о величине термотоков при резании. Первая же попытка оценить эту величину экспериментальным путем привела, как мы уже знаем, к казавшимся неправдоподобно большим значениям  $I_t$  (5,2—5,5А) [131].

Действительно, из рассмотрения нагрузочных (рис. 82) и являющихся их разновидностью вольтамперных характеристик

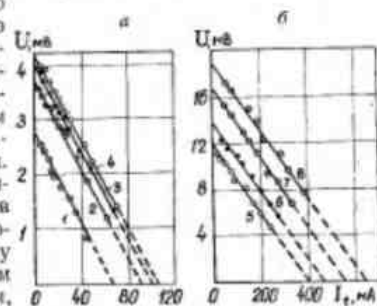


Рис. 84. Вольтамперные характеристики термоэлементов резац—деталь, образующихся при тчении стали 18Х2Н4ВА с различными скоростями резания [220]:

а—резание резац из Р16 со скоростью резания: 1—21,5 м/мин; 2—32; 3—40; 4—50; б—резание резац из ВК15 со скоростью резания: 1—50 м/мин; 2—75; 3—100; 4—300

(рис. 84), полученных Афанасьевым и Бобровским в предположении о линейном характере зависимости  $I_t$  от  $\mathcal{E}$ , [220], следует, что протекание во внешнем контуре термотоков, исчисляемых амперами, нереально. Даже в случае более мощного из исследованных термоэлементов величина тока короткого замыкания, найденная экстраполяцией кривой  $I=f(U)$ , не могла превысить 700 мА, что практически саначало возможность работы такого термоэлектрического генератора, всегда имеющего нагрузку  $R_0 > 0$  только при меньших токах.

Данные Бобровского, согласно которым сила термотока во внешнем контуре часто находится в пределах 5—15 мА [222], подтвердила недавно Маркосян [224] при исследовании в различных скоростных диапазонах следующих естественных термопар: Р18 — сталь 45, ВК8—1Х18Н9Т, ВК8 — ЭИ835, ВК8 — сталь 45, Т15К6 — сталь 45. Используя компенсационный метод измерения слабых токов, широко применяемый в гальванометрических компенсаторах [225], она показала, что термоэлектрический ток, протекающий по цепи *резец — изделие — токозвездик — резец*, изменяется в пределах от 8 до 95 мА, а в реальных условиях резания он может оказаться во много раз меньше из-за электрического сопротивления станка, которое заметно увеличивается с началом работы.

Однако, как это будет ясно из дальнейшего, для нас особенно интересен другой результат наблюдений Маркосян, о котором сообщается в работе [226]. Автор пишет, что «величины мгновенных значений термотоков испытывают не поддающиеся учету пульсации, характеризующиеся резкими взлетами кривых на осциллограммах». Отмечается, что максимумы термотоков могут приближаться по своим значениям к токам короткого замыкания.

Несмотря на аргументированность выводов Бобровского и Маркосян относительно величины термотоков при резании, было бы весьма рискованно опираться на них именно в тех экспериментальных ситуациях, которые могут быть непосредственно связаны с динамикой термоэлектрических процессов. В таких случаях, на наш взгляд, правильнее ориентироваться на сведения, говорящие как раз о правдоподобности полученных Аксером результатов (речь идет о возможном порядке величины  $I_t$ ).

Измеряя падение напряжения на очень низкоомном резисторе, с помощью которого имитировалось сопротивление контакта между деталью и станком, Дубров и сотр. [227] зарегистрировали при фрезеровании токи в пределах 0,6—0,8 А. Примерно такие же по величине термотоки (0,4—0,75 А) зафиксировал при строгании металлов Лебедев [112], причем вычисленная им плотность тока в зоне резания составляла десятки ампер на 1 см<sup>2</sup> площади контакта реза с деталью<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Подобная по величине плотность была найдена и для акустоэлектрического тока (в натрии) при интенсивности воли механических напряжений  $\sim 1$  Вт/см<sup>2</sup> [112].

Для случая малых сопротивлений внешнего контура измерения протекающих в нем термотоков при продольном течении стали 9ХС цельным быстрорежущим резцом из Р18М проводились Якуниным с сотр. [228]. Схема опытов приведена на рис. 85. В качестве четырех эталонных сопротивлений использовались участки медного кабеля, выбранные таким образом, что  $R_{01} = 8,7 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $R_{02} = 5,2 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $R_{03} = 8,2 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $R_{04} = 2,0 \cdot 10^{-4}$  Ом.

Согласно полученным данным величина  $I_t$  достигала 4,5 А при минимальном из указанных сопротивлений (рис. 86).

Авторы также исследовали влияние величины протекающего через зону резания термотока на термо-э. д. с. естественной термопары. Расчетным путем было установлено (при  $R_{01} \sim 0,001$  Ом), что с увеличением токовой нагрузки на термоэлектрический генератор величина  $\mathcal{E}_t$  заметно снижается (рис. 87). Объяснение этого результата явлением Пельтье не может вызвать никаких возражений с точки зрения термодинамики<sup>1</sup>.

Об установившихся термоэлектрических величинах в несколько ампер, протекавших в режиме, близком к короткому замыканию термоэлемента *резец — деталь*, сообщалось и авторами работ [217, 218].

Подвергать данные результаты сомнению нет никаких оснований, ибо даже в опытах на специальной машине трения (рис. 88) автору легко удалось получить термотоки силой до 1,5—1,75 А. Величина  $I_t$  определялась по напряжению на измерительной катушке сопротивления типа Р310, включенной в термоэлектрическую цепь, составленную из двух неподвижных и двух вращающихся образцов по схеме: 2Х13←скользящий контакт→Х18Н10Т←неподвижный контакт→2Х13←скользящий контакт→Х18Н10Т. Парное скольжение, сопровождавшееся интенсивным износом образцов, осуществлялось со скоростью  $\sim 1,3$  м/с при симметричном рычажном нагружении до 18 кг.

После изложенного выше еще более отчетливо проявляется роль, которую могут играть термоэлектрические процессы во внутренних низкоомных контурах зоны резания. Именно здесь в результате различного проявления температурно-скоростного

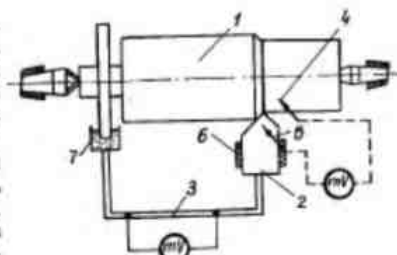


Рис. 85. К определению термоэлектрических параметров (схема измерений) [228]:

1—эталонная; 2—резец; 3—эталонное сопротивление; 4—шунт из стали 9ХС; 5—шунт из Р18М; 6—изоляционные прокладки; 7—ручной токозвездик

<sup>1</sup> См. также гл. V, § 1.

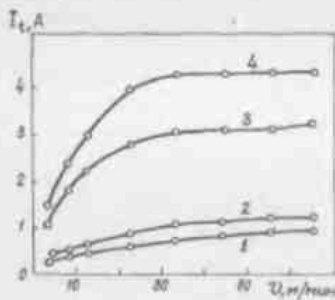


Рис. 86. Зависимость величины термотока от скорости резания [228]:  
1—цикл включения в цепь  $R_{21}$ ; 2— $R_{32}$ ; 3— $R_{31}$ ; 4— $R_{44}$

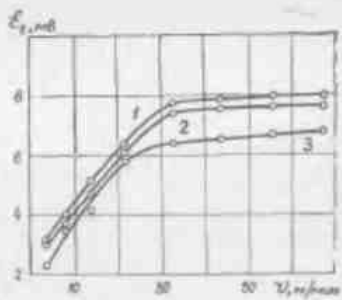


Рис. 87. Зависимость величины термо-Э.Д.С. от скорости резания [228]:  
1—измерения микровольтметром; 2—расчет при включении в цепь  $R_{21}$  и  $R_{32}$ ; 3—то же при  $R_{31}$  и  $R_{44}$

и температурно-деформационного факторов на контактных площадках как бы автоматически создаются условия для протекания локальных термотоков большой силы. К сожалению, прямых измерений этих токов вихревого характера осуществить фактически невозможно. Что же касается определения параметров внут-

ренних термоэлектрических контуров путем, например, сверления деталей с зажатой между ними и одновременно электрически изолированной от них тонкой металлической фольгой [229], раздельного сверления комплекта трубок—образцов различного диаметра [230] или одновременного сверления двух изолированных друг от друга трубок—стаканов [231], то численные значения термо-э.д.с. и токов, полученные авторами этих специальных приемов, представляют весьма относительную ценность. Они соответствуют заведомо отягченным от реальных условиям теплового баланса и могут быть резко искажены влиянием статической электризации резанием изоляционных прокладок [109].

Сказанное, однако, не исключает появления практических рекомендаций, связанных с возможностью управления термоэлектрическими процессами, протекающими во внутренних контурах. К такого рода рекомендациям относится, в частности, предложение автора учитывать механизм проводимости инструментального и обрабатываемого материалов при выборе их оптимального сочетания [25]<sup>1</sup>. С точки зрения последствий ограничения термотоков при прочих равных условиях оно должно соответствовать наименьшему значению относительного коэффициента Зеебека [232] (см. также гл. V, § 3).

### § 2. Влияние состояния термоэлектрической цепи на стойкость режущего инструмента и шероховатость обработанной поверхности

Прежде чем перейти к изложению основного содержания параграфа, сделаем ряд предварительных замечаний.

Изменение стойкости элементов трущихся пар (режущего инструмента) при изменении состояния термоэлектрической цепи фрикционной системы (*инструмент—деталь—станок*) путем замыкания ее внешнего контура, компенсации в нем термо-э.д.с. или пропускания электрического тока от постороннего источника иногда в литературе называют эффектом ГАО (Гордиенко—Аксера—Опигца). Поскольку в данном случае мы имеем дело не с открытием новых, а с проявлением уже известных закономерностей, такое название представляется не совсем удачным. Самому воздействию на внешний контур имело как методу повышения стойкости подошло бы, вероятно, название «метод ГАО». Что же касается результатов этого и ему подобных воздействий, то в дальнейшем мы будем называть их «эффектами изменения электрического состояния» (ИЭС).

Как один из практически полезных эффектов ИЭС нас прежде всего интересовал эффект замыкания внешнего контура

<sup>1</sup> Эта рекомендация относилась также к подбору материалов при комплектовании фрикционных пар.

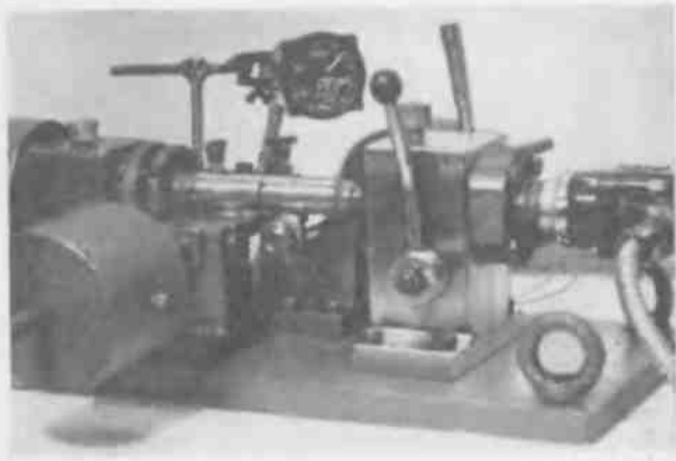


Рис. 88. Общий вид специальной установки для исследования термоэлектрических явлений при трении

(электрической изоляции инструмента), характеризуемый соответствующим критерием эффективности метода ГАО:  $K_0 = T_p/T_a$  ( $T_p$  — стойкость инструмента при разомкнутой термоэлектрической цепи *инструмент — деталь — станок*;  $T_a$  — стойкость инструмента в обычных условиях резания, т. е. когда цепь термотока замкнута). Но задача автора состояла не столько в определении количественных значений  $K_0$ , сколько в выяснении тех физических причин, которыми эти значения могли быть обусловлены. Качественный анализ результатов, полученных при явно выраженном эффекте ИЭС, возможен и без применения наиболее точных методов математической статистики. К этим методам необходимо прибегать с целью количественной оценки  $K_0$  в стадии разработки рекомендаций по промышленному использованию эффекта. Однако, учитывая более чем трехкратное рассеяние стойкости быстрорежущих сверл с примерно одинаковой твердостью и теплоустойчивостью [233], вряд ли есть смысл приводить значения  $K_0$  с точностью до сотых, как это часто делается в работах Бобровского [28, 109 и др.].

Для быстрого и сравнительно точного определения  $K_0$  при сокращенных затратах средств предлагается способ, описанный в приложении 1, к сожалению, пока не проверенный.

Настоящий параграф включает результаты экспериментальных работ автора и соавт. [29, 232, 234, 235 и др.], изложению которых предшествуют некоторые сведения, почерпнутые из опубликованного в печати материала по использованию метода ГАО<sup>1</sup>. Вот они:

— средняя стойкость быстрорежущих сверл после размыкания цепи термотока или включения в нее внешнего источника (разумеется, что речь идет о внешнем контуре) увеличивалась при обработке титановых сплавов (BT3-1, OT4, BT22 и др.) от 2 до 4,5 раза, а содержащих титан сталей (X18H9T, X18H10T и др.) — от 1,5 до 3,5 раза;

— размыкание цепи термотока приводит к изменению характера износа сверл: износ по задним поверхностям становится более равномерным при одновременном снижении износа по ленточкам;

— влияние размыкания цепи на стойкость инструмента сильнее сказывается в том случае, когда при прочих равных условиях обработка ведется на станке с меньшим сопротивлением или, что считается эквивалентным с точки зрения естественного изменения  $R_0$ , с меньшей скоростью [109]. Различное проявление эффекта электрической изоляции инструмента в зависимости от скорости (рис. 89) связывается также с изменением преобладающего вида износа по схеме: абразивно-химический (окислительный) →

→ адгезионный → диффузионный [237];

— одним из следствий размыкания цепи *инструмент — деталь — станок* является уменьшение микротвердости нароста и приростовой части стружки, а также степени наклепа обработанной поверхностью [237, 238]. Такое изменение состояния тонких поверхностных слоев, обнаруженное при исследовании микрорельефа корней стружек, было подтверждено с помощью метода фотостимулированной элюэктронной эмиссии, уровень которой возрастал при переходе от отожженного образца к образцу, обработанному с электрической изоляцией, и затем — при обычном резании [239]. Эффект ИЭС, стало быть, выражается в изменении соотношения между твердостью инструмента и твердостью контактных слоев стружки, что в свою очередь, согласно [240], должно приводить к снижению переноса материала инструмента, увеличению пройденного им пути, а значит, и его стойкости;

— протекание через зону резания тока от хромель-алюмелевой термопары ( $\mathcal{E} \sim 14-16$  мВ) в направлении, совпадающем с направлением термотока, значительно повысило стойкость быстрорежущих резцов из стали P18 при точении стали Ст 3 в среде кислорода, тогда как встречное включение термопары по отношению к термоэлементу *резец — деталь* вызывало заметное понижение стойкости [241];

— метод ГАО позволяет добиться улучшения чистоты обработанной поверхности в среднем на один класс, что объясняют лучшей смазочной функцией тонких окисных пленок, образующихся на контактных площадках в условиях менее интенсивного окисления, т. е. при отсутствии термотока [242], ослаблением адгезии металлов, стимулятором которой термоток является [237]<sup>1</sup>, ограничением вредного действия импульсных (искровых) электрических разрядов [243, 244, 22], способствующих, как предполагается в последней работе, «адгезионному схватыванию»;

— размыкание цепи термотока и пропускание через зону резания постоянного тока различного направления силой 0,06; 0,12; 0,6 и 1,2 А либо приводят к незначительному изменению усилий резания, либо не влияют на них совсем [242, 227];

— применение СОЖ, как правило, ощутимо снижает критерий эффективности метода ГАО;

— отрицательная оценка метода ГАО, вытекающая из ряда

<sup>1</sup> Эта точка зрения совпадает с высказывавшейся автором ранее.



Рис. 89. Зависимость критерия эффективности от скорости резания при точении стали 30ХГСА твердосплавным инструментом (Т15К6) [237];

1 —  $s=0,3$  мм/об,  $t=0,5$  мин; 2 —  $s=0,1$  мм/об,  $t=0,5$  мин

<sup>1</sup> Систематизация данных такого рода применительно к различным операциям обработки резанием (точению, сверлению, фрезерованию и т. п.) послужила работа [236].

работ [223, 226, 245—248 и др.], базируется на экспериментах по точению твердосплавным инструментом и, насколько известно автору, не относится к случаю сверления инструментом из быстрорежущей стали.

В самой первой серии опытов по проверке эффекта электрической изоляции сверл из быстрорежущей стали Р18 нами использовались два материала с различным механизмом проводимости: нержавеющая сталь ВНС-5 и титановый сплав ВТ5. Измерения показали, что при одной и той же разности температур между горячим и холодным концами термоэлемента величина  $\mathcal{E}_i'$  в цепи пары Р18—ВТ5 ( $p-n$ -переход) значительно превышает соответствующее значение  $\mathcal{E}_i''$  в цепи пары Р18—ВНС-5 ( $p-p$ -переход). Отсюда следовало, что при обработке титанового сплава ВТ5 быстрорежущей сталью электрическая изоляция инструмента может дать больший эффект, нежели при обработке стали марки ВНС-5.

Стойкостные испытания сверл диаметром 10 мм со стандартной геометрией, соответствующей РТМ 5-65 (заточка нормальная), проводились без охлаждения на вертикально-фрезерном станке модели 6М12П; условия опытов приведены в табл. 10.

Таблица 10

Марка материала	Предел прочности $\sigma_s$ , кг/мм <sup>2</sup>	Толщина заточки $L$ , мм	Резьба резания		Оптимальный критерий затупления $d_{\text{опт}}$ , мм
			$\alpha$ , мм/мм	$\lambda$ , мм/об	
ВТ5	95	25	8	0,10	0,2
ВНС-5	120	25	6	0,09	0,4

За критерий затупления принимался оптимальный износ по задней поверхности на периферии сверла  $d_0$ , измерившийся с помощью лупы Бринелля. Для разрыва электрической цепи *инструмент — деталь — станок* применялась текстолитовая втулка, которая насаживалась на цилиндрический хвостовик сверла.

Результаты испытаний представлены на рис. 90. Приближенная оценка этих результатов говорила о том, что при обработке нержавеющей стали ВНС-5 средняя стойкость сверла, изолированных в электрическом отношении, возрастала менее чем в 2 раза, тогда как при резании сплава ВТ5 она увеличивалась более чем в 5 раз. Наблюдения за динамикой износа сверл по задней грани с помощью микроскопа БМИ убедительно показали, что при сверлении титанового сплава разрушение инструмента в случае замкнутой цепи происходит намного быстрее, чем при работе с изолирующей втулкой.

Перед описанием основной серии стойкостных испытаний необходимо заметить, что существует несколько способов замыкания цепи термотока: нанесение на хвостовик сверла изоли-

рующего покрытия, использование сверл с коническим пластмассовым хвостовиком, применение стального переходного конуса с внутренней капроновой оболочкой, изоляция детали от приспособления прокладками из пластика и т. д. Все эти способы могут положительно влиять на стойкость режущего инструмента и качество обработанной поверхности. Однако если сопоставить преимущества и недостатки различных видов электроизолирующей технологической оснастки, то окажется, что с практической точки зрения далеко не безразлично, каким именно образом обесточена цепь *инструмент — деталь — станок*.

Пластмассовый конус может рассматриваться как демифер механических колебаний, применение которого, независимо от его электроизолирующих свойств, позволяет уменьшить шероховатость обработанной поверхности и увеличить стойкость инструмента [249—252 и др.]. Но, согласно имеющимся сведениям [253], наличие пластмассового хвостовика снижало жесткость узла *сверло — приспособление — шпиндель*, вызывая тем самым несколько больший износ инструмента. Поэтому для размыкания термоэлектрического контура в дальнейшем применялся склеенный сверлильный патрон, один и тот же во всех опытах. Искусственное замыкание цепи осуществлялось шунтом с малым омическим сопротивлением (рис. 91).

На сверлильном станке мод. 2А135 обрабатывались нержавеющая сталь ВНС-5 и ЭИ654, конструкционная сталь ЭИ643 и титановый сплав ВТ5. Так как материалы, поступающие на предприятие, проходили входной контроль, дополнительный анализ их химического состава не проводился.

Заготовки ковали из одних и тех же прутков (помарочно), после чего они приобретали форму прямоугольных плит, толщи-

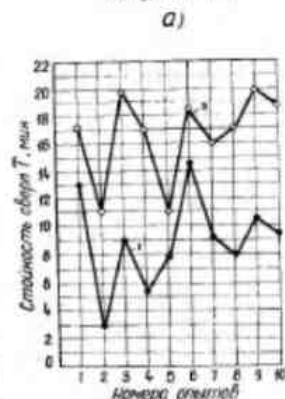
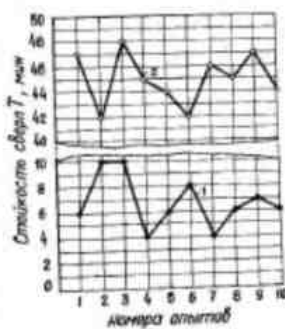


Рис. 90. Повышение стойкости сверла путем их электрической изоляции (1 — цепь замкнута, 2 — разомкнута) при обработке материалов с различным механизмом проводимости:

а — титанового сплава ВТ5 ( $n$ -тип); б — нержавеющей стали ВНС-5 ( $p$ -тип). Материал режущего инструмента — быстрорежущая сталь Р18 ( $p$ -тип)

ну которых выбирали с учетом диаметра сверла  $D$ . Как правило, она составляла  $(2 \div 3) D$ . Затем заготовки подвергали термической обработке, по окончании которой у материалов ВНС-5, ЭИ654, ЭИ643 и ВТ5 наблюдались почти те же механические свойства, что и в состоянии поставки.

Для стойкостных испытаний были использованы партии сверл из быстрорежущей стали Р18 с диаметрами 5,1; 7,2; 10 и 15 мм. За критерий затупления вновь принимался оптимальный износ по задней поверхности на периферии сверла. В каждом конкретном случае величине оптимального износа  $\delta_0$  соответствовало некоторое фиксированное количество просверленных отверстий, что давало возможность отобрать инструмент по однородности. К испытаниям эффективности метода ЛАО допускались лишь те сверла, величина износа которых  $\delta$  при том же числе просверленных отверстий не выходила за установленные верхний и нижний пределы:  $\delta_0 - \Delta \leq \delta \leq \delta_0 + \Delta$ , где  $\Delta \approx (0,1 \div 0,2) \delta_0$ . Заточку инстру-



Рис. 91. Вид патрона со сверлом и передней ступицей, соединенных жестким медным проводником

мента выполняли при условии точного соблюдения его геометрии (задний угол на периферии составлял  $12^\circ$ , а угол при вершине  $2\varphi = 127 \pm 3^\circ$ ).

Эффект проверялся в присутствии СОЖ — был использован 5%-ный водный раствор эмульсола.

Результаты этого исследования в виде зависимостей (в двойной логарифмической сетке) стойкости инструмента  $T$  от скорости резания  $v$ , подачи  $s$  и диаметр  $D$  показаны на рис. 92—95, где  $a$  — при  $s = 0,11$  мм/об и  $D = 10$  мм;  $b$  — при  $v = 4,4$  м/мин и  $D = 10$  мм;  $c$  — при  $v = 4,4$  м/мин и  $s = 0,15$  мм/об.

Как видим, в зависимости от марки обрабатываемого материала отношения стойкости сверл при разомкнутом контуре к стойкости сверл, закороченных со станком, могут быть следующими:

материал	ВНС-5	ЭИ654	ЭИ643	ВТ5
$T_{\text{от}}/T_{\text{з}}$	2—3	1—7	1—4	3—6

Оказалось, что при резании сплава одной и той же марки эффект электрической изоляции инструмента может проявлять себя по-разному, если изменится диаметр сверла  $D$ . С увеличением  $D$ , например, отношение  $T_{\text{от}}/T_{\text{з}}$  резко уменьшается при обработке стали ЭИ654, возрастает почти до двукратного значения

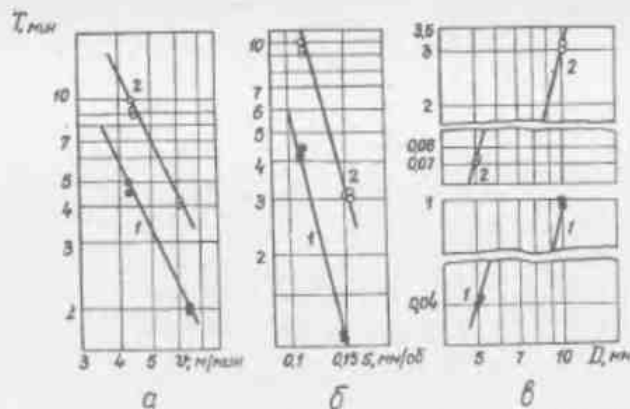


Рис. 92. Эффект электрической изоляции сверл из стали Р18 при резании стали ВНС-5 ( $\delta_0 = 0,4$  мм):

1 — сверло закорочено; 2 — разомкнуто

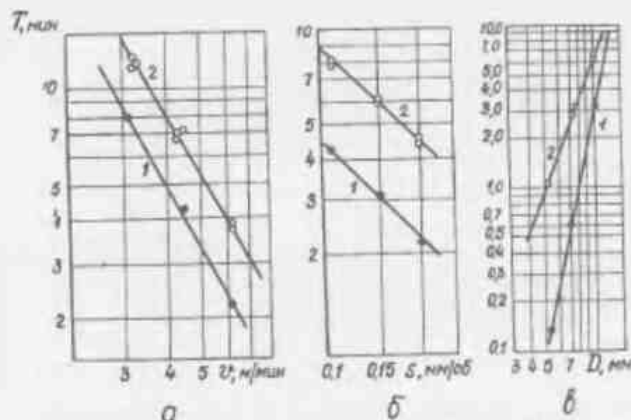


Рис. 93. Эффект электрической изоляции сверл из стали Р18 при резании стали ЭИ654 ( $\delta_0 = 0,3$  мм):

1 — сверло закорочено; 2 — разомкнуто

при обработке сплава ВТ5, но остается практически неизменным для стали ВНС-5. Этот факт чрезвычайно любопытен, и мы еще вернемся к нему несколько позже (гл. V, § 3).

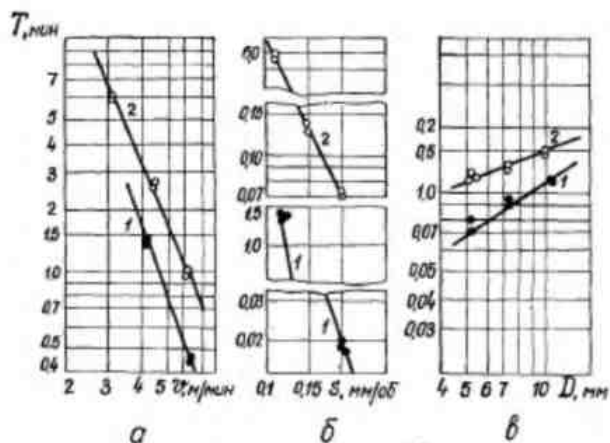


Рис. 94. Эффект электрической изоляции сверла из стали P18 при резании стали ЭИ643 ( $\delta_0=0,2$  мм):  
1—цель термотока заплуга; 2—разомкнута

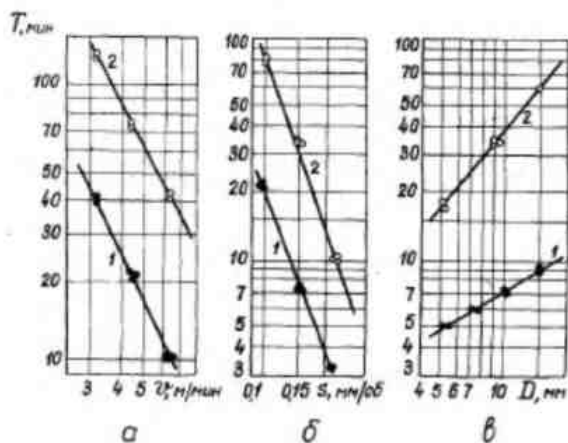


Рис. 95. Эффект электрической изоляции сверла из стали P18 при резании сплава BT5 ( $\delta_0=0,2$  мм):  
1—цель термотока заплуга; 2—разомкнута

Обработка результатов через тангенсы углов наклона линий  $T-v$ ,  $T-S$  и  $T-D$  позволила сопоставить формулы скорости резания для различных состояний цепи термотока (табл. 11).

Таблица 11

Формулы типа  $v=f(T, S, D)$  для различных состояний термоэлектрической цепи инструмент—деталь—станок

Материал	Предел прочности св., кг/мм <sup>2</sup>	Внешний контур	
		заплуг	разомкнута
ВНС-5	130	$v_s = 0,004D^{1,7} / T^{0,26} S^{1,7}$	$v_p = 0,006D^{1,7} / T^{0,26} S^{1,7}$
ЭИ654	73	$v_s = 0,004D^{2,72} / T^{0,28} S^{0,66}$	$v_p = 0,057D^{1,77} / T^{0,28} S^{0,66}$
ЭИ643	190	$v_s = 0,042D^{0,23} / T^{0,28} S^{1,64}$	$v_p = 0,370D^{0,13} / T^{0,23} S$
BT5	75	$v_s = 0,210D^{0,22} / T^{0,26} S^{1,5}$	$v_p = 0,195D^{0,66} / T^{0,28} S^{1,9}$

Из приведенных формул следует, что при работе с изолирующим приспособлением можно форсировать режимы резания, если исходить из условия  $T_p = T_s$ . Для ВНС-5, например,  $v_p/v_s = 1,5$ .

В дополнительной серии опытов по определению величины  $K_n$  при обработке без СОЖ только титановых сплавов, обладающих очень низкими антифрикционными свойствами [254], нами было получено:

Быстрорежущая сталь	P12		P18	
	титановый сплав	BT3	OT4-1	OT4-1
$T_p/T_s$	4	4,5	3	2,5

На основании изложенного был сделан вывод, что замыкание термоэлектрической цепи инструмент—деталь—станок способно обеспечить достаточный резерв стойкости быстрорежущих сверл и тем самым позволяет увеличить производительность обработки резанием.

### § 3. Переменная составляющая термо-э. д. с. и ее роль в изучении динамики контактных процессов

Неоднократно отмечая ошибочность положений работы [107], автор в то же время подчеркивал, что сам энергетический подход к изучению процесса скольжения металлов и предложенный Дубининым метод регистрации переменной составляющей разности потенциалов между трущимися поверхностями заслуживают серьезного внимания [108].

Коробов [243] и автор [25] независимо друг от друга впервые протравкирировали указанный метод на процесс резания.



Повторяя некорректные выкладки Дубинина применительно к резанию металлов, Коробов нашел, что величина электрического потенциала на поверхности микроконтактов достигает значений, превышающих 1 кВ. Эта ошибка и повлекла за собой совершенно необоснованные предположения об искровой форме разрядов между металлическими обкладками условного конденсатора. В последующих своих работах Коробов, переплю, учел критические замечания, сделанные по поводу методики, принятой им для расчетов (см. гл. II, § 2). В работе [255], в частности, сообщается, что «при резании металлов возникают непрерывно меняющиеся по частоте и амплитуде термоэлектрические потенциалы, величина которых колеблется от 0,25 до 2,5 мВ, в зависимости от условий обработки ... при скорости резания  $v=25 \div 60$  м/мин характерны колебания потенциалов с низкой частотой (100—300 Гц) и небольшой амплитудой (0,4—0,6 мВ); при  $v=200 \div 300$  м/мин амплитуда колебаний возрастает до 2—2,5 мВ, а частота — до 5000 Гц». Важными результатами наблюдений автора являются отмеченные им соответствия оптимальной гео-



Рис. 96. Отскоки инструмента (сплав Т15К6) при соударениях с выступами шероховатости на поверхности вращающейся детали (сталь 45)

метрии инструмента и его наибольшего износа переменной составляющей  $E_0$ , в первом случае — минимальной, во втором — максимальной. В работе отчетливо выражена тенденция сделать упор на динамику термоэлектрических процессов; предполагается, например, что влияние скорости резания на амплитуду и частоту колебаний потенциалов связано с изменением характера температурного и динамического воздействий на очаги термоэлектронной эмиссии. Все это, однако, преследует цель обосновать возможность концентрированного износа инструмента по задней поверхности вследствие его электрической эрозии в импульсных микроскопических разрядах.

Для исследований автора, в основу которых положена регистрация переменной составляющей термо-э.д.с., была и остается характерной другая направленность. Уже с самого начала мы рассматривали такую регистрацию прежде всего как метод изучения динамики контактных процессов, считая, что электроэрозионный вид износа не может быть явно преобладающим при работе металлической пары без вибрационных отскоков индентора (инструмента). Лишь в условиях чистовой обработки, когда из-за очень малой величины сечения среза создается благоприят-

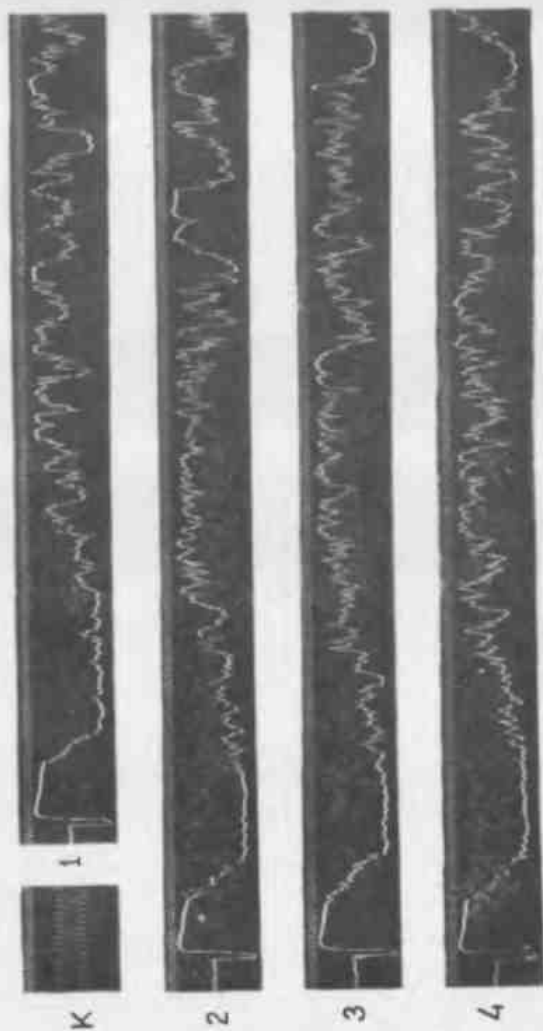


Рис. 97. Повторяемость характера кривых, иллюстрирующая изменение разности потенциалов между инструментом (сталь П18) и обрабатываемой деталью (сталь 45) после отгибания по сферическим аркам при строгании. Режимы резания:  $v=18$  м/мин,  $a=0,6$  мм/об,  $z=1$  мм. Частота отсчетов времени  $f_0=500$  Гц; К — калибровочный сигнал (10 мВ)

ная ситуация для полного нарушения контакта при вибрационных толчках, допускалась возможность значительной эрозии, что совпадало с выводами Коробова, хотя и основывалось на совершенно иных теоретических предпосылках (см. гл. V, § 1). Наглядной иллюстрацией отскоков инструмента (сплав Т15К6) при его соударениях с выступами шероховатости на поверхности вращающейся детали (сталь 45) является рис. 96.

Убедившись в воспроизводимости характера потенциалограмм, получаемых с помощью усилителя биопотенциалов УБП-01<sup>1</sup> и шлейфного осциллографа в одних и тех же условиях обработки (рис. 97), автор попытался проанализировать влияние режимов резания на переменную составляющую  $\mathcal{E}_b$ , что привело его к следующим результатам [25, 26]:

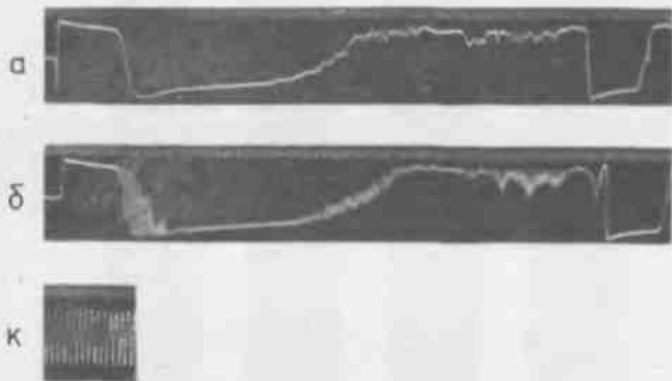


Рис. 95. Переменная составляющая разности потенциалов между инструментом (сталь Р18) и деталью (сталь 18Х2Н4ВА) при строгании с острой режущей кромкой (а) и после ее затупления (б).

Режимы резания: а—б)  $v=2$  м/мин;  $f=0,6$  мм/об;  $T=1$  мин. Частота отсчетов времени  $f_s=50$  Гц; К—калибровочный сигнал (20 мВ).

— регистрация данной составляющей может рассматриваться как метод получения информации о темпе износа инструмента (рис. 98);

— эта составляющая практически не зависит от подачи и глубины резания в случае черновой или полужесткой обработки металлов (рис. 99, 100);

— амплитудно-частотный спектр колебаний разности потенциалов является функцией скорости резания и воспроизводит амплитудно-частотный спектр колебаний системы, генерирующей

<sup>1</sup> Построен по дифференциальной схеме.

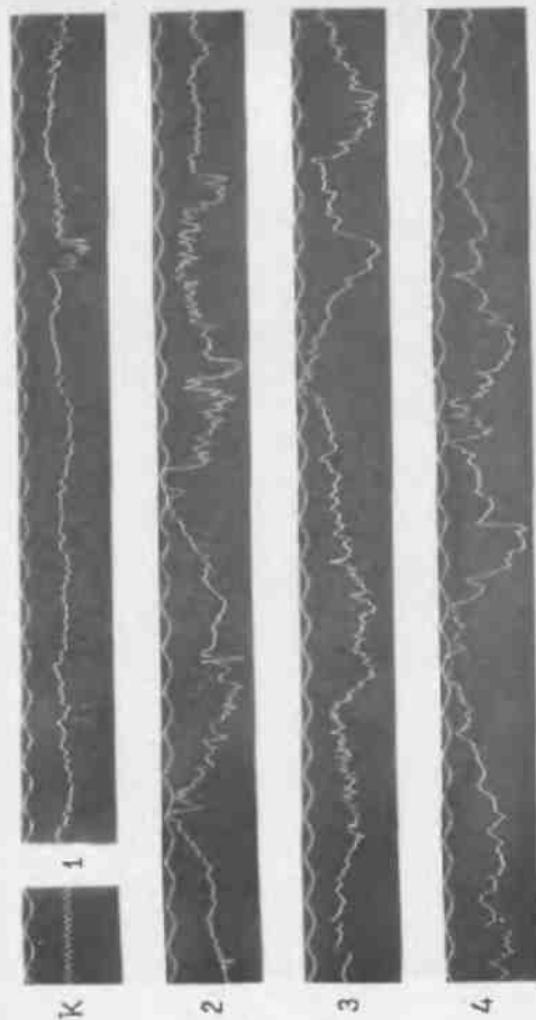


Рис. 98. Влияние подачи (1) на характер изменения разности потенциалов между инструментом (сталь Т15К6) и обрабатываемой деталью при продольном точении стали ( $v=45$  м/мин,  $f=1$  мм): 1—0,06 мм/об; 2—0,101 мм/об; 3—0,228 мм/об; 4—0,33 мм/об. Частота отсчетов времени  $f_s=50$  Гц; К—калибровочный сигнал (20 мВ).

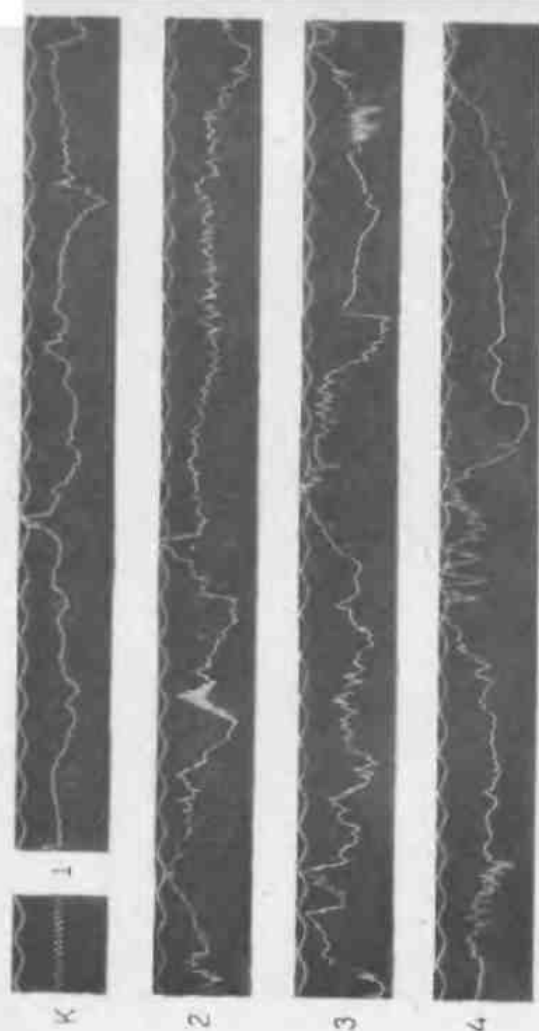


Рис. 100. Влияние глубины резания ( $f$ ) на характер изменения разности потенциалов между инструментом (сплав Т13К6) и обрабатываемой деталью при продольном токарном резании ( $v = 45$  м/мин;  $s = 0,28$  мм/об): 1—0,5 мм, 2—1,5 мм, 3—4,5 мм, 4—0,5 мм. Частота отсчетов времени  $f = 20$  Гц;  $k = 1$  мВ/дел; масштаб отсчета (20 мкс).

электрические заряды (рис. 101). При малых значениях и наиболее отчетливо проявляются низкочастотные колебания обрабатываемой детали. С увеличением скорости резания наблюдается как бы потеря чувствительности к вынужденным колебаниям у подсистемы *деталь — станок*, тогда как подсистема *резец — суппорт* становится особенно восприимчивой к вибрациям. При больших значениях  $v$  возникают квазипериодические колебания инструмента повышенной или даже высокой частоты со всеми вытекающими из этого последствиями.

Как показал общий анализ записей, полученных при трении и резании, пульсация разности потенциалов между трущимися поверхностями вызвана не только изменением емкости frictionного конденсатора. Вследствие вибраций и дискретности контакта происходит непрерывная флуктуация его фактической площади. Внутреннее омическое сопротивление источника будет попеременно то возрастать, то падать, тем более если при скольжении со скачками свобода нормальных перемещений ползуна ограничена только частично. Наложение обертонов на основную частоту пульсаций может быть вызвано как разрядами в форме смешанной электрошумной эмиссии (главным образом, автоэмиссии ювелирных поверхностей), так и исключительной гетерогенностью поверхностей, состоящих из перемежающихся участков различной электрической проводимости. Структурные превращения, уничтожение порядка в кристаллической решетке при температурных всплесках, изменение микрогеометрического профиля поверхности, окисление металла, деструкция тонких смазочных пленок и т. п. — все это сразу же отражается на величине контактного сопротивления, тем более в условиях вызываемого вибрацией фреттинга [256]. Кроме того, к вероятным причинам колебаний  $\mathcal{E}_k$ , специфичным для процесса резания, относятся: неоднородность обрабатываемого материала по структуре и физическим свойствам, образование и срыв нароста, цикличность стружкообразования и др. [238].

Совершенно очевидно, что из опытов автора вытекала целесообразность гармонического анализа спектра колебаний  $\mathcal{E}_k$  и выяснения зависимостей его характеристик от условий контактного взаимодействия, преобладающего вида износа и т. д. Это следовало также из упоминавшейся в главе II работы [116], посвященной гармоническому анализу спектра колебаний силы трения. Рассматриваемая проблема в целом была так сформулирована Давушиным [257]: «Вероятно, целесообразно исследовать и возможность решения другой задачи: с помощью возникающей при резании естественной термопары резец — заготовка хотя бы приблизительно определить обрабатываемость материала и измерить интенсивность размерного износа инструмента — в целях автоматизации установления оптимального режима резания».

Фактически продолжением работ автора в указанном направлении стали исследования Кретицина [20, 258]. Поскольку пере-

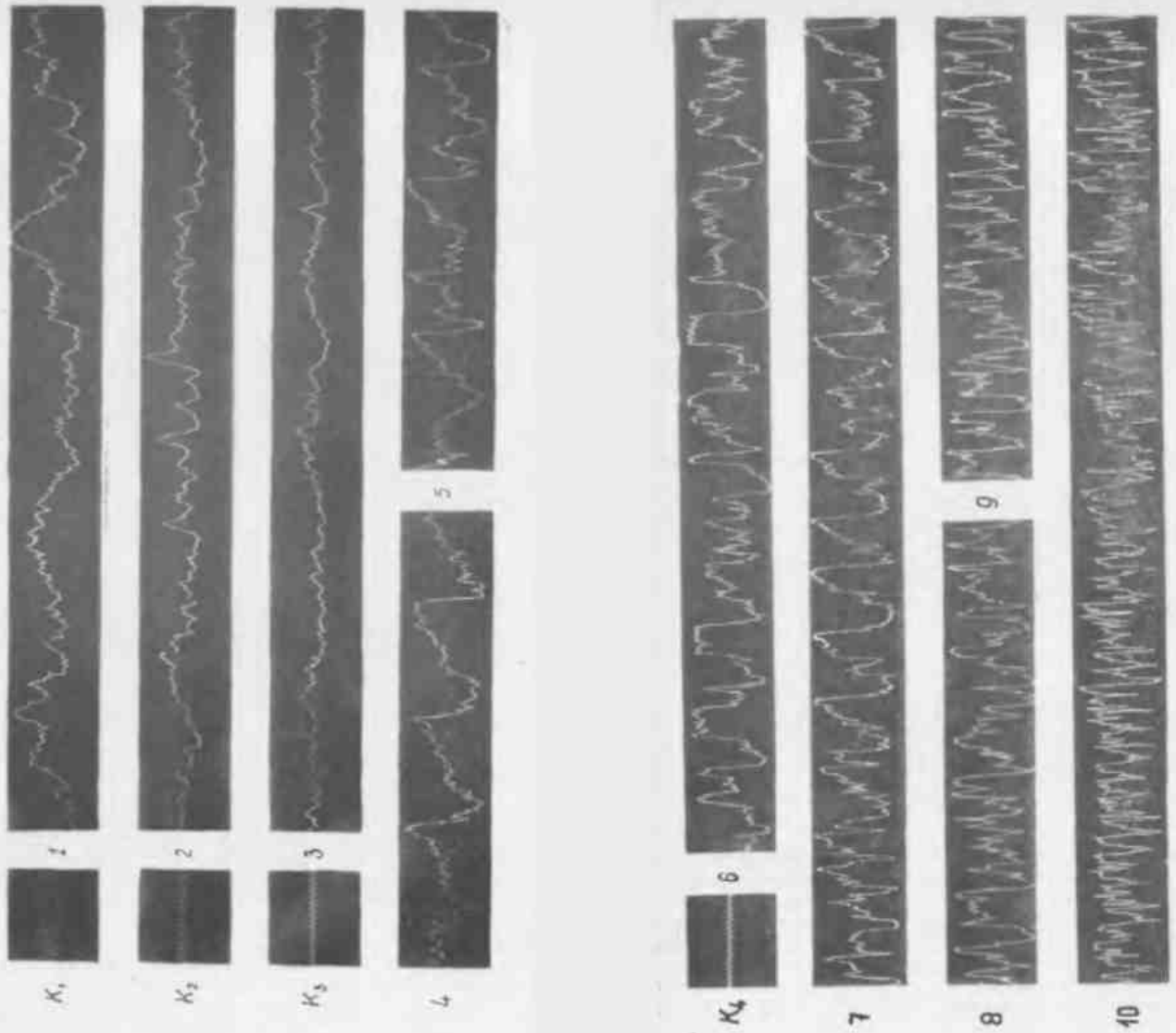


Рис. 101. Влияние скорости вращения ( $v$ ) на переменную составляющую разности потенциалов между индукторами (сплошная линия) и обработанной-волл детектора при вращении токовой стали 45 ( $i=0,328$  мА/мм;  $f=1$  мГц):  
 1—4 мГц; 5—13 мГц; 6—20 мГц; 7—30 мГц; 8—50 мГц; 9—100 мГц; 10—177 мГц; 11—320 мГц.  
 Частота вращения: 1—500 Гц; 6), 8), 10) 4000 об/мин; 7) 1770 об/мин; 9) 3200 об/мин.

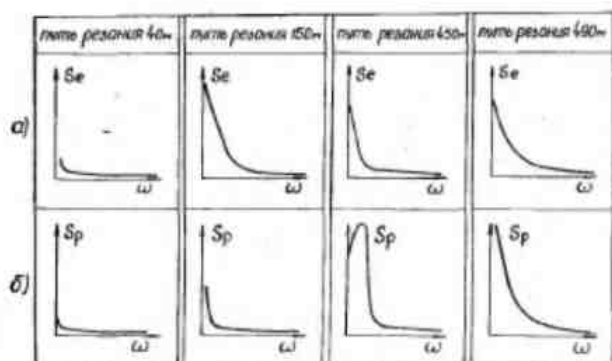


Рис. 102. Изменение спектра колебаний термо-э.д.с. (а) и силы резания (б) по мере увеличения износа реза из сплава Т5К10 при точении стали 40Х всухую [20]

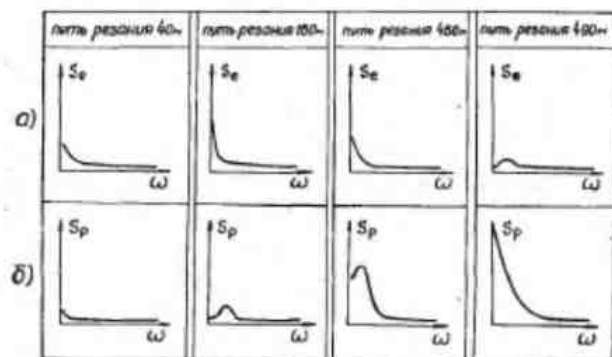


Рис. 103. Изменение спектра колебаний термо-э.д.с. (а) и силы резания (б) по мере увеличения износа реза из сплава Т5К10 при точении стали 40Х с поливом 30%-ной эмульсии НГЛ-205 [20]

менные составляющие термо-э.д.с. и сил резания являются эргодическими стационарными случайными функциями, оказалось возможным резко ограничить число их реализаций, необходимое для расчета спектральных плотностей  $S_e(\omega)$  и  $S_p(\omega)$ , описывающих частотный состав колебаний  $\xi_t$  и силы  $P_p$  на различных стадиях процесса затупления режущего инструмента. Полученные кривые (рис. 102 и 103) весьма наглядно показывают, каким образом изменяется распределение энергии по частотам и как

сильно снижается интенсивность колебаний при использовании СОЖ. Вычисление и нормирование соответствующих взаимных корреляционных функций позволило установить, что при резании всухую колебания  $\xi_t$  и  $P_p$  определяются в основном одними и теми же факторами: коэффициент взаимной корреляции их переменных составляющих достигает значений  $\sim 0,76$ , а то время как при резании с поливом СОЖ он уменьшается до  $0,3-0,4$ .

При изучении спектра переменной составляющей термо-э.д.с. была также предпринята попытка обнаружить в нем частотные полосы, скоррелированные с темпом износа инструмента [258]. То обстоятельство, что коэффициент взаимной корреляции превысил 99%-ный уровень значимости для целого ряда частот, рассматривается автором как доказательство развиваемого им представления о процессе износа режущего инструмента как совокупности «отдельных актов разрушений, происходящих со статистически определенной частотой и интенсивностью».

Хотя и известно, что статистические критерии не могут доказать ни одной гипотезы, полученный результат очень важен, ибо он указывает на «отсутствие опровержения» нового метода изучения стойкостных зависимостей при резании (трении). С помощью этого метода, в частности, можно идентифицировать случаи износа, относящиеся к различным его видам, и исследовать причины так называемого «стойкостного парадокса», т. е. немонотонного изменения функции  $T(v)$ , одной из которых, на наш взгляд, является резонансно-избирательный механизм диссипации энергии при трении (резании), приводящий к появлению фрикционного спектра поглощения  $F(v)$  (см. гл. I, § 4). Как автоматически действующий источник информации о характере процессов в зоне резания и степени затупления режущей кромки, термоэлемент *инструмент-деталь* представляет собой превосходный датчик обратной связи, использование которого вместе с анализатором спектра соответствующего частотного диапазона может облегчить решение задач по автоматическому управлению технологическими процессами обработки металлов резанием.

Мы не будем задерживаться на обсуждении физических аспектов этой проблемы, отметим только, что из факта существования при трении флуктуаций числа и подвижности носителей заряда, а также фактической площади контакта и эффективной площади поверхности, с которой происходит эмиссия (фрикционный фликкер-шум), вытекает математическая аналогия наших задач с проблемой исследования электрических шумов в электронных лампах и полупроводниковых приборах.

В заключение хотелось бы еще раз подчеркнуть, что сторонние силы, работа которых определяет величину э.д.с., генерируемой при трении и резании даже при отсутствии СОЖ на водной основе, имеют различную физическую природу (гл. II, § 3). Поэтому во всех рассмотренных случаях контактного взаимодействия было бы правильнее, вероятно, говорить об интегральной

электродвижущей силе фрикционной системы и спектре ее колебаний. Только так, разумеется, мы и должны поступать в условиях применения СОЖ, обладающих электролитическими свойствами.

#### § 4. Информационное содержание потенциалогрaмм при резании в электролитических средах

Соображения, развитые в этом параграфе, касаются вопроса о проникающей способности смазочно-охлаждающих жидкостей и отражают некоторые результаты работ автора по оценке такой способности фактически с помощью прототипа описанного выше метода (см. гл. III, § 3).

СОЖ является универсальным средством, с использованием которого резко повышаются экономические и производственные показатели процесса обработки металлов резанием. Почти вся совокупность применяемых ныне в жидком виде технологических средств смазки и охлаждения может быть разделена на три категории: безводные неактивные и активные масла на основе жировых и минеральных масел; эмульсолы; синтетические жидкости, представляющие собой истинные или коллоидные водные растворы. Последний класс СОЖ стал широко применяться в промышленности сравнительно недавно. Будучи отличными хладагентами, синтетические жидкости часто включают в себя комбинации (смеси) таких, например, компонент, как: а) амины и нитриты (неорганические и органические) — для предотвращения коррозии; б) нитраты — для нитритной стабилизации; в) фосфаты и бораты — водоумягчители; г) мыла и смачивающие агенты — для смазки и уменьшения поверхностного натяжения; д) соединения фосфора, хлора и серы — для образования химических смазочных пленок; е) гликолы — в качестве связующих веществ; ж) гербициды — для повышения бактериологической устойчивости и т. д. [259]. Чтобы дать грамотные рекомендации по выбору и приготовлению СОЖ, т. е. чтобы в известной мере научно предвидеть, каким же будет механизм действия смазочно-охлаждающей среды в любом конкретном случае, необходимо знать состав жидкости и ее физико-химическую активность, учитывать характер операции обработки и режимы резания, располагать достоверными сведениями о поведении и свойствах обрабатываемого материала в процессе стружкообразования.

К данной работе не имеют непосредственного отношения вопросы, связанные с одним из основных функциональных свойств СОЖ — их охлаждающей способностью. Тем не менее хотелось бы подчеркнуть, что смазочное действие жидкости, если иметь в виду его благотворное влияние на температурный режим при

трени поверхностей, может также частично рассматриваться и как охлаждающая функция СОЖ. С другой стороны, прямой отбор тепла, зависящий от таких свойств жидкости, как удельная теплоемкость, теплота парообразования и теплопроводность, препятствует размягчению металлических мылов, развитию поворотной изомерии у молекул поверхностно-активных веществ, снижает вероятность десорбции этих молекул, а значит, и повышает смазочную способность среды. Итак, смазывая, жидкость охлаждает, и, наоборот, охлаждая, жидкость смазывает.

В условиях интенсивной пластической деформации срезаемого слоя, высоких зонных температур и удельных давлений на инструмент, достигающих для сверхпрочных специальных сплавов до 30 000—40 000 кг/см<sup>2</sup>, вопрос о проникающей способности СОЖ приобретает первостепенное значение. Указанное свойство жидкости обычно ассоциируется с представлением о возможности смазочной среды попадать в коммуницирующие участки полости между стружкой и инструментом, при этом совершенно не упоминается об объеме распространении молекул смазки по внутренней микрокапиллярной системе «врожденных» микрощелей и зародышевых микротрещин, возникающих в процессе деформации, о проникновении атомов и ионов — продуктов термического и каталитического распада молекул — через искаженную кристаллическую решетку твердых тел. Между тем есть довольно веские основания полагать [260—263 и др.], что даже при наличии всестороннего сжатия в зоне первичной деформации частицы поверхностно-активных веществ и химически активных жидкостей могут быстро внедряться в наружный слой переходной пластической зоны (со стороны напыла перед стружкой) и мигрировать в глубину поликристаллического металла путем нерегулярной диффузии по дефектам решетки — полым дислокационным ядрам или границам блоков. Такая «молекулярно-атомная пропитка» твердого тела происходит вследствие капиллярного всасывания смазочно-охлаждающей жидкости, благодаря термодиффузионным процессам на внутренних фазовых поверхностях, а также за счет сил электростатического притяжения частиц. Проникнуть внутрь деформируемого металла способны только частицы низкомолекулярных или ионных соединений, чьи размеры не превышают соответствующих размеров входных ультрапор; подвижность частиц зависит от их полярности и величины электростатических зарядов ионов твердого тела. Нам представляются вполне закономерными выводы [140], согласно которым эффективное внутрисмазывающее действие соединений хлора — четыреххлористого углерода, хлористого бария, хлористого кальция и т. п. — обусловлено малым атомным радиусом (1,07 Å) и высокой подвижностью ионов хлора<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> О разложении нейтрального  $CCl_4$  с выделением хлора в зоне резания сообщается в работе [263].

При напряженных режимах резания, когда смазочная среда переходит из жидкого состояния в газообразное (парообразное), становится очевидной та выдающаяся роль, которая принадлежит геттерам. Интенсивность газопоглощения определяется химической активностью веществ по отношению к кислороду, водороду, азоту, окиси углерода и т. д., способностью растворять газы или удерживать их на поверхности. Геттерами, как уже отмечалось, являются тантал, титан, ниобий и некоторые другие металлы. На тантал, например, при повышенной температуре действуют кислород, сера и галонды; свойствами титана как газопоглотителя<sup>1</sup> объясняется, вероятно, тот факт [265], что с повышением содержания карбидов титана в твердом сплаве исчезает парост на передней грани инструмента и уменьшается шероховатость обработанной поверхности<sup>2</sup>.

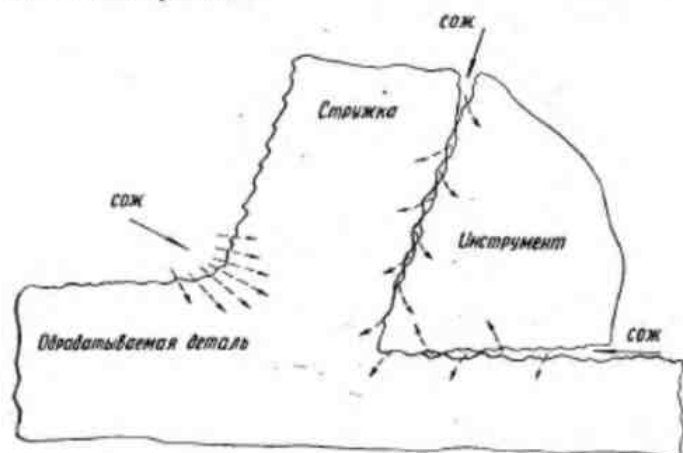


Рис. 104. Пути, по которым смазочно-охлаждающая жидкость устремляется в зону резания

Механизм проникновения смазки в прирезцовый слой стружки и в пристружечный слой резца, равно как и механизм пропитки третьего тела, образовавшегося в непосредственной близости

<sup>1</sup> Высокая растворимость кислорода в титане отмечается в [264].

<sup>2</sup> Заметим попутно, что ввод твердых смазок в деталь (например, свободного свинца или сульфидов металлов) может резко ухудшить функциональные свойства аэрокосмических материалов. Исключением, с точки зрения целесообразности металлургической пропитки, является кобальт, спрессованный и спеченный до 85%-ной теоретической плотности. В качестве «смазки» пористого кобальта применяются металлы с границированной кубической решеткой [266].

к режущей кромке в результате схватывания металлов, совершенно аналогичен описанному выше. Однако следует иметь в виду, что попасть в данные объемы металла СОЖ может преимущественно лишь после того, как она оказалась в полости между инструментом и стружкой (рис. 104). Распространение смазочной среды по трущимся пограничным поверхностям обусловлено все теми же капиллярными силами, силами электростатического притяжения и тепловым движением ионов, атомов и молекул. Но на первый план теперь уже выступают акты высшего (адсорбционного) адаптивирования поверхностно-активных веществ, образование катионных и анионных слоев на контактных поверхностях [139], рост индивидуализированных химических пленок и т. п. Начиная проникать в щелевое пространство со стороны отхода, отслаивания стружки от передней грани, смазка как бы просачивается последовательно через ряд фильтров с различной пористостью, причем размеры пор уменьшаются по мере приближения к режущей кромке вплоть до нескольких ангстрем. Естественно поэтому, что крупные молекулы типичных поверхностно-активных веществ — органических кислот и спиртов — могут застрять при такой селективной фильтрации на довольно значительном расстоянии от лезвия инструмента, даже если произошла сольватация поверхностных ионов и появилось расклинивающее давление<sup>1</sup>. Что касается вероятности обильного смазывания всей передней грани, то весьма убедительным является довод о вакуумном всасывании СОЖ в полость между резцом и стружкой вследствие вибраций режущего инструмента и срывов нароста на его поверхности [269, 270]. Отмеченные условия всасывания способствуют проявлению некоторых физических свойств смазочно-охлаждающих жидкостей, в том числе поверхностного натяжения, вязкости и плотности.

На основании изложенного уже отмечалось [25], что нужно с большой осторожностью подходить к выбору тех критериев, которые позволяют, в лучшем случае, оценить возможность смазочных сред попасть на границу раздела контактирующих металлов при известных заранее обстоятельствах. Было бы опрометчивым, по-видимому, называть эти критерии проникающей способностью жидкости, рассматривать любой из них в качестве своеобразной константы СОЖ. Автор считает, например, что плотность электролитного тока в присутствии пористой перегородки [140] может лишь условно трактоваться как показатель проникающей способности синтетических смазок, применяемых при обработке металлов резанием.

Решение вопроса о механизме проникновения смазочно-охлаждающих жидкостей в области контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью становится менее слож-

<sup>1</sup> Явление расклинивающего действия тонких слоев жидкости обстоятельно изучено Б. В. Дерягиным [267, 268].

ним, если получить экспериментальные данные, содержащие информацию типа: «есть пленка», «нет пленки», «пленка сплошная» (в смысле полного отсутствия чисто металлических контактирующих островков), «пленка с разрывами» и т. п. (разумеется, начальные условия опытов должны сохраняться неизменными).

С целью получить указанную информацию величина интегральной э.д.с.  $\mathcal{E}_i$  подавалась на вход дифференциального усилителя УБП-01, но теперь уже при резании с СОЖ, в качестве которых были выбраны водные растворы галлонпроизводных веществ и их смеси с поверхностно-активным веществом, содержащим гидрофильную группу. Чтобы активировать СОЖ, применялся изопропиловый спирт, показавший наиболее высокую смачивающую способность при сравнении его с глицероном и глицерином. Обработывались медь и стали марок 45, 18Х2Н4ВА, ОХНЗМ. Материал режущего инструмента — быстрорежущая сталь Р18 или титано-вольфрамо-кобальтовый сплав Т15К6. О порядке величины э.д.с. у гальванических пар обрабатываемое изделие — резец, замкнутых на большое сопротивление, позволяет судить табл. 12.

Таблица 12

Разность потенциалов между инструментом и обрабатываемой деталью, погруженными в водный раствор электролита, мВ (с сопротивлением внешней цепи равно 1 МОм)

Электролит	Концентрация, %	Вольтаметр *		
		сталь Р18 — медь	сталь Р18 — сталь 45	сталь Р18 — сталь ОХНЗМ
HCl	1	200	- 25	30
	5	210	- 28	30
NH <sub>4</sub> Cl	1	190	-110	-60
	5	220	- 80	-20
NaCl	1	140	- 44	-20
	5	150	- 56	10

\* При обратной полярности гальванического элемента  $\mathcal{E}_i$  (ст. 6 ПБ) вычитается его значение.

Усилитель будет открыт, если его чувствительность соответствует значению переменной составляющей  $\mathcal{E}_j \approx \mathcal{E}_i$  в случае прямого металлического контакта, но он немедленно закроется — произойдет отсечка сигнала (рис. 105), когда  $\mathcal{E}_j \rightarrow \mathcal{E}_e$ , т. е. поверхности металлов соприкасаются через пленку электролита-индикатора и пленки образовавшихся на них химических соединений, электрическое сопротивление которых значительно больше сопротивления металлических  $\alpha$ -ячей. Вероятно, именно эти пленки несут основную нагрузку, однако у них есть два удиви-

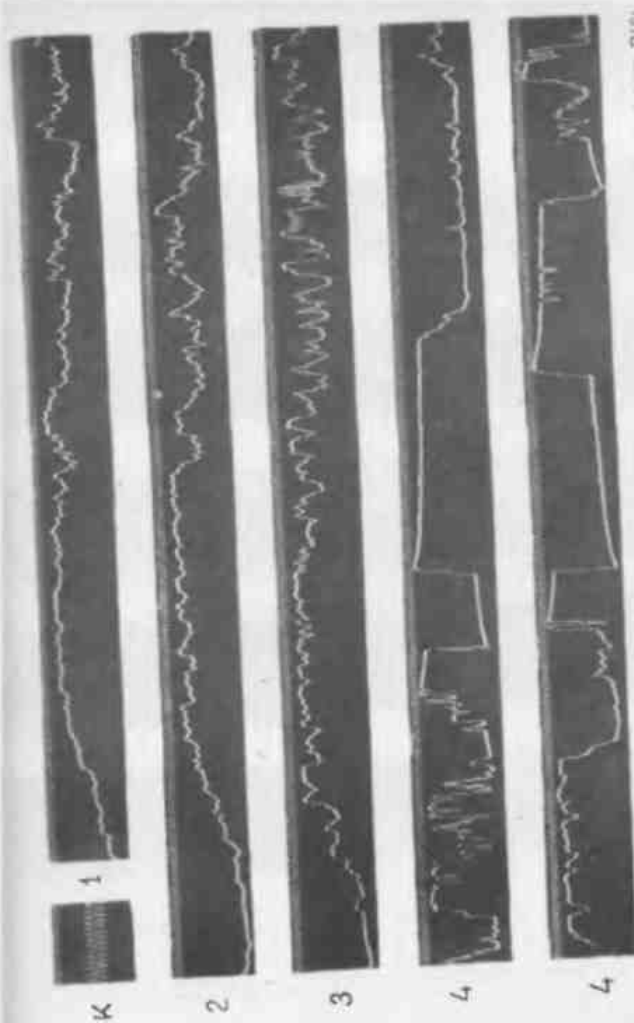


Рис. 105. Осциллограммы переменной составляющей разности потенциалов между инструментом (сталь Р18) и обрабатываемой деталью (сталь 18Х2Н4ВА) при строгании в воздухе и различных водных средах электролита: 1 — вода; 2 — 0,5% водн. раствор СЭЖ-01; 3 — 0,5% водн. раствор СЭЖ-01 + 10% водн. раствор СЭЖ-02; 4 — 0,5% водн. раствор СЭЖ-01 + 10% водн. раствор СЭЖ-02; 5 — 0,5% водн. раствор СЭЖ-01 + 10% водн. раствор СЭЖ-02 + 10% водн. раствор СЭЖ-03. Частота строгания  $f = 50$  Гц;  $K$  — калибровочный сигнал (длина).



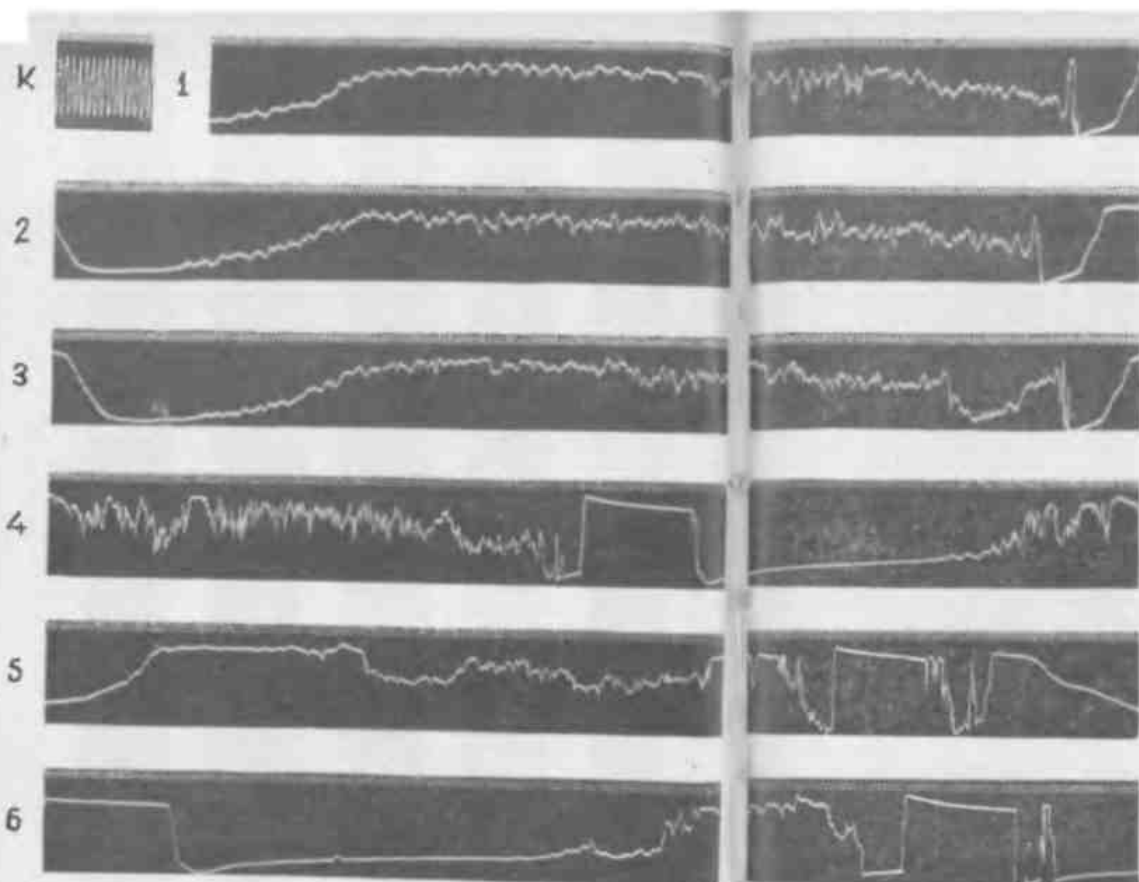


Рис. 106. Потенциалограммы, снятые при строгании меди в воздухе и различных электролитах на стали Р18.

1 — воздух; 2 — 1% раствор  $\text{CuSO}_4$ ; 3 — 10% раствор  $\text{CuSO}_4$ ; 4 — 1% раствор смеси  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Частота отсчета времени  $\tau_1 = 500 \text{ Гц}$ ;  $R$  — коэффициент усиления;  $\tau = 0,5 \text{ мкс}$ ; ход:  $1-1 \text{ мВ}$

и в водных средах (полив) инстру-

$\text{NH}_4\text{Cl}$ ; 5 — 10% раствор  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ; 6 — 10% раствор смеси  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Режим резания:

избавиться путем подключения канала усиления сразу же после презания инструмента, когда смазывающий информационный сигнал успевает, вероятно, исчезнуть из-за малости времени релаксации (рис. 106, 4—6).

и высокую осевую упругость метиленовых цепей, если молекулы изопропилового спирта рассматривать как достаточно жесткие атомные комплексы.

Во избежание недоразумений следует указать на один методический недостаток, который относится к экспериментам по строганию и связан с тем, что не были своевременно приняты во внимание малая длина заготовки и, как следствие, короткий путь резания. Уже в ходе опытов выяснилось, что усилитель надолго замирает не столько сигналами, соответствующими переходам  $0 \rightarrow \mathcal{E}_1(\mathcal{E}_2)$  перед презанием и после выхода инструмента из детали в случае полива электролитом, сколько сигналами, обусловленными как раз скачками потенциала при попадании и исчезновении контакта (вспомните, что контактная разность потенциалов достигает значений  $\sim 1\text{В}$ ). Поэтому при строгании на воздухе и с применением раствора изопропилового спирта, где это обстоятельство не учитывалось, лишь последние участки записей, на которых, кстати, отчетливо виден момент выхода инструмента из детали (рис. 106, 1—3), оказались несущими полезную информацию. Ситуация стала повторяться и в опытах с электролитами, но от нее удалось

очень активных помощника, без которых устойчивость таких пленок, даже в условиях резания пластичной меди, была бы невозможна. Мы имеем в виду противодействие сольватных ролей молекул дальнейшему сближению трущихся поверхностей

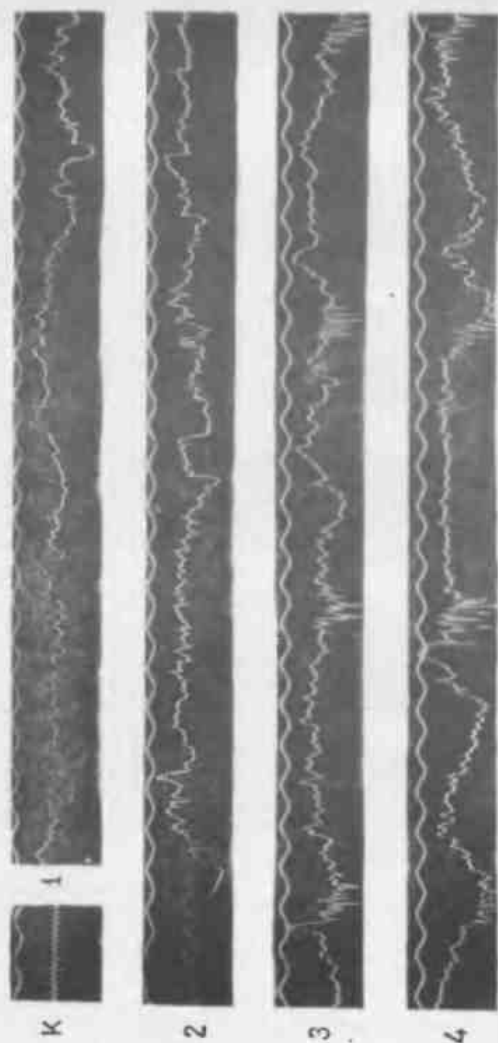


Рис. 107. Потенциограммы, снятые при проволочном титровании в различных водных средах (пошаги) ионструментом из сплава Т15К6:

1—1% вод. раствор NiBr<sub>2</sub>·2·10-моль раствор NaCl; 2—1% вод. раствор ZnBr<sub>2</sub>·10-моль раствор CaCl<sub>2</sub>; 3—1% вод. раствор PbBr<sub>2</sub>·10-моль раствор CaCl<sub>2</sub>; 4—1% вод. раствор CuBr<sub>2</sub>·10-моль раствор CaCl<sub>2</sub>. Скорость титрования: 1—20 мл/мин; 2—30 мл/мин; 3—35 мл/мин; 4—35 мл/мин. Температура: 20±0,5°C; pH: 10,0.

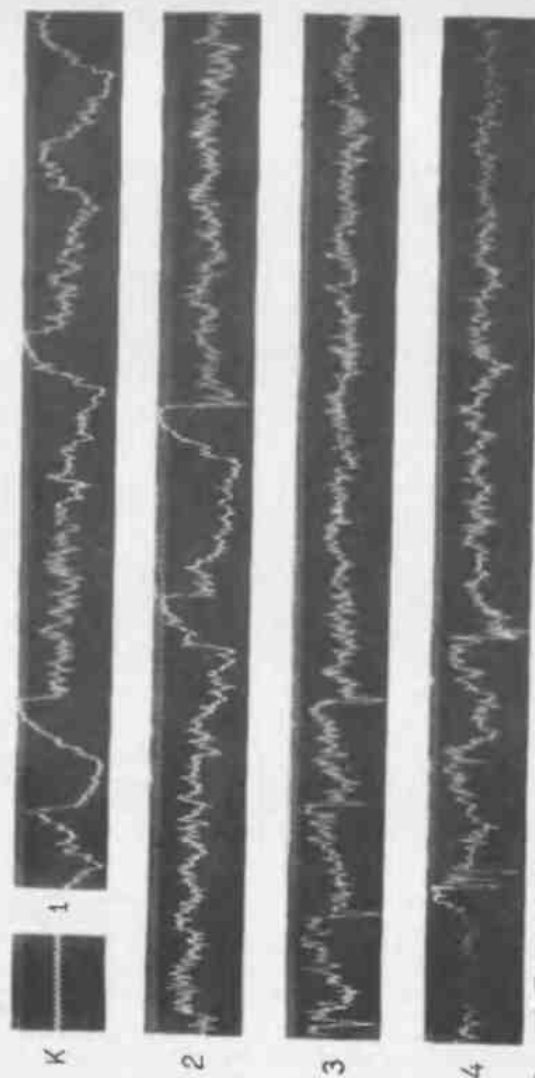


Рис. 108. Потенциограммы, снятые при проволочном титровании сплава 40 в различных водных средах (пошаги) ионструментом из сплава Т15К6:

1—1% вод. раствор NiBr<sub>2</sub>·2·10-моль раствор NaCl; 2—1% вод. раствор ZnBr<sub>2</sub>·10-моль раствор CaCl<sub>2</sub>; 3—1% вод. раствор PbBr<sub>2</sub>·10-моль раствор CaCl<sub>2</sub>; 4—1% вод. раствор CuBr<sub>2</sub>·10-моль раствор CaCl<sub>2</sub>. Скорость титрования: 1—20 мл/мин; 2—30 мл/мин; 3—35 мл/мин; 4—35 мл/мин. Температура: 20±0,5°C; pH: 10,0.

Хотелось бы также подчеркнуть, что вопрос о природе скачка потенциала, заирирующего промежуточный усилитель, остается пока открытым. Согласно [271], например, вода и ее пар не уступают по термоэлектрическим свойствам, а точнее по величине коэффициента Зеебека, лучшим образцам полупроводников. Что касается продолжительности отсечки сигнала, то специфика работы усилителя не позволяет полностью отождествлять ее со временем «жизни» сплошных экранирующих пленок. Кроме того, при проведении подобных экспериментов необходимо иметь в виду возможность взаимной компенсации составляющих интегральной э.д.с. и, следовательно, ее инверсии.

Независимо от сделанных замечаний потенциалограммы, полученные при строгании в условиях интенсивных вибраций резца, позволяют убедиться в двух моментах [17, 111]:

— способность СОЖ проникать на контактные площадки непосредственно связана с динамическими явлениями в системе *станок — инструмент — деталь*;

— добавка к водным растворам электролитов одноатомного спирта ( $C_2H_5OH$ ) повышает металлофильность сред, их смачивающую и смазывающую способность.

С практической точки зрения результаты опытов по строганию говорили скорее о полезности применения нового метода не в случае обычного непрерывного резания, а при вибрационном, прерывистом резании, с целью подбора рецептур СОЖ и оптимальных режимов гармонических колебаний инструмента (принудительных вибраций).

Однако и при непрерывном резании регистрация переменной составляющей разности потенциалов между инструментом и обрабатываемым изделием дает возможность получить информацию о степени участия СОЖ в контактных процессах [17, 26]. Автору было ясно, что экстремальные всплески кривых, наблюдавшиеся при продольном точении (потенциалограммы 3, 4 на рис. 107 и 108), также связаны с какими-то особыми факторами, характерными для процесса резания и вызывающими резкую и циклическую аномалию в поведении фактической площади контакта. Как показали записи, частота экстремальных всплесков при обработке меди в точности соответствует числу оборотов, совершаемых заготовкой в 1 с. Отсюда последовало предположение, что и в данном случае механизм проникновения смазки на поверхность раздела металлов имеет прямое отношение к колебательным движениям: СОЖ или ее пары устремляются в зону резания при несовпадении фаз и амплитуд низкочастотных колебаний детали и высокочастотных колебаний инструмента. Но есть, как нам кажется, основания считать, что при резании стали 45 подобным особым фактором, вызывающим резкие ослабления металлического контакта, может оказаться периодически повторяющийся срыв нароста на передней поверхности резца, приводящий, вследствие образования вакуума, к практически

мгновенному всасыванию СОЖ в полость между инструментом и стружкой (см. потенциалограммы).

После всасывания жидкости колебания  $\mathcal{E}_f(\mathcal{E}_i)$  низкой частоты заметно ослабевают, что, помимо смазочного действия СОЖ, изменяющего характер колебаний инструмента, может быть связано по крайней мере еще с двумя причинами: во-первых, наличие электропроводной промежуточной фазы способствует быстрой нейтрализации электрических зарядов, генерируемых на обкладках фрикционного конденсатора; во-вторых, электролитическая среда как бы стабилизирует внутреннее омическое сопротивление источника.

И снова результаты экспериментов подтвердили высокую адсорбционную способность линейных полярных молекул с одним активным центром, расположенным на конце.

В работе [18] поднимался вопрос о возможности автоматического поиска оптимальных составов СОЖ при помощи самонастраивающейся системы, источником информации в которой и одновременно датчиком обратной связи являлась бы сама зона резания. Идея создания такой системы и даже предлагавшиеся способы ее реализации (в общем виде) основывались на тех же физических предположениях, что и идея разработки устройств для автоматизации управления процессом резания, — она затронута в предыдущем параграфе. В сущности говоря, мы имеем дело со звеньями одной и той же цепи исследований, исходным элементом которой оказалась регистрация переменной составляющей интегральной электродвижущей силы.

## Глава V

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ТЕРМОТОКА ПРИ РЕЗАНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

#### § 1. Критический обзор представлений о механизме влияния термотока на износ трущихся пар и металоорежущего инструмента

Как показывает экспериментальный материал, накопленный к настоящему времени, разрушительная функция термотока может быть связана с различными по природе процессами. Сложность механизма влияния термотока на износ именно в том и состоит, что он определяется совокупностью указанных процессов. В связи с тем, однако, что в конкретных условиях контактного взаимодействия лишь один из процессов является, как правило, преобладающим, прибегают к дифференцированному рассмотрению, например, электроэрозионного, электродиффузионного или других видов износа, вызванных протеканием термоэлектрического тока через поверхность раздела металлов.

Исследовав, каким образом естественное состояние термоэлектрической цепи трения пары и подключение к ней внешнего источника отражаются на износе образцов, Гордиенко [21] высказали предположение, что термоток, возникающий при трении металлических тел, так же, как и ток, поступающий от внешнего источника, оказывает на трущиеся поверхности эрозионное, разрушающее действие, видимо по природе аналогичное тому, которое имеет место при электроискровой обработке металлов.

Как уже отмечалось, неправильные в своей основе теоретические рассуждения привели Дубинина [107] и Коробова [243] к выводу о возможности молекулярного дробления материала индентора (резца) искровыми и коронными разрядами.

Аналогичной точки зрения, с той, однако, разницей, что особое внимание в ней обращается на термическую природу эрозионных процессов, придерживаются Дубров и сотр. [22, 272, 273 и др.]. Ориентируясь на величину термо- э.д.с. порядка от 1 до 15 мВ, на величину сопротивления станка ~ от десятых долей до десятков ом и, наконец, на значения термотоков в пределах от десятых долей до сотен миллиампер, авторы считают, что применительно

к резанию металлов «может идти речь о низковольтных маломощных разрядах в очень малых искровых промежутках». Разумеется, только убедившись в справедливости этого тезиса, есть смысл переходить к обсуждению в общем-то не вызывающей возражений версии, согласно которой выделение в контактных микрообъемах дополнительной тепловой энергии приводит к появлению в структуре твердого сплава дефектного слоя из-за сильно отличающихся по величине коэффициентов линейного расширения карбидов и связки. Кстати сказать, именно эта версия Дуброва в свете развиваемых им представлений об электроэрозионном износе инструмента была поддержана Макаровым и Коленченко [274].

Во всех без исключения работах Дуброва и сотр. по данному вопросу непосредственно отмечаются или подразумеваются два основных исходных момента: «...предполагается, что контакт резец — заготовка можно считать прерывистым (имеется в виду не разрыв всего контакта деталь — инструмент, а непрерывная смена контактирующих точек детали и перемещающегося вдоль нее резца). По аналогии с обычными электрическими контактами предполагается, что и в случае резания (трения) металлов износ режущего инструмента происходит как следствие разрядов, возникающих в микроконтактах в зоне резания».

Авторы, по-видимому, не учли того обстоятельства, что разрыв многоточечного электрического контакта в отдельных его точках, пусть даже с максимально достигаемой практически скоростью, никак не может быть эквивалентен прерыванию тока, протекавшего через те или иные контактные площадки до начала их расхождения. Отсюда, если даже не касаться специфики трения, а только источников э.д.с., вытекает несостоятельность сделанных выводов о тех же причинах и характере электроэрозионного износа при резании, что и «при коммутации любых электрических цепей» [272], а тем более опытов по моделированию такого износа с помощью электрической дуги [273].

Согласно [275, 109], повышение стойкости инструмента при размыкании цепи термотока нельзя объяснить уменьшением электроэрозионного износа поверхностей. Бобровским, однако, была неверно истолкована позиция автора, и только после соответствующего дополнительного разъяснения<sup>1</sup> им стала упоминаться «поправка» автора к гипотезам, появившимся вслед за уже известной работой Дубинина.

С некоторыми незначительными дополнениями воспроизведем здесь то, о чем уже писалось автором ранее и сообщалось на научном семинаре в Институте машиноведения [25, 26].

Пусть, например, скольжение стружки сопровождается отскоками инструмента от обрабатываемой детали, причем условие полной потери контакта между ними является пока необязатель-

<sup>1</sup> В личной переписке.

ным. Амплитуда колебаний такова, что так называемое «кислородное голодание» передней и задних граней прекращается и их участки, расположенные близ режущих кромок, получают возможность, как говорят, «дышать», т. е. затягивать воздух, приходящий в соприкосновение с открытыми контактными площадками. Очевидно, что тенденция металлов к образованию окислов, а во многих случаях и нитридов, скажется практически мгновенно. На чистой поверхности разогретого сплава начнут появляться очаги эмбриопленок — продуктов скоротечной реакции окисления. Но зародышевая хемосорбированная (либо адсорбированная) пленка развиваться как сплошная не сможет, если поле внутри пленки окажется порядка  $10^6$  В/м, что повлечет за собой ее пробой.

При высокочастотных колебаниях инструмента (индентора) напряженность электрического поля достигает, по-видимому, величины, необходимой для инициирования самостоятельного разряда в так называемой тихой форме. Время, в течение которого расстояние между обкладками фрикционного конденсатора возрастает до  $50 \text{ \AA}$ , составляет весьма малую часть от полного времени отскока. Это означает, что на самом раннем этапе разделения поверхностей далеко не все заряды двойного электрического слоя будут успевать рекомбинировать благодаря поверхностной проводимости (обратным токам) или за счет туннельного эффекта (в форме автоэлектронной эмиссии). Нейтрализация части разноименных зарядов может происходить по механизму газового разряда, тем более когда поверхность раздела фаз имеет большое электрическое сопротивление или контакт нарушается полностью.

Контактная электризация особенно заметна при трении металла о неметалл (см. гл. VI). Если утечки зарядов с поверхности твердого тела не происходит и сосредоточенный суммарный заряд увеличивается, мы вправе ожидать появления разряда даже в искровой форме. Стало быть, возможность эрозионного разрушения материалов в искровых микроскопических разрядах необходимо учитывать при граничном трении металлических поверхностей в присутствии смазочных пленок с явно выраженными диэлектрическими свойствами [111]. При этом очень важно отметить, что снижение скорости изнашивания трущихся пар в указанных условиях достигается как раз не размыканием, а, наоборот, замыканием электрической цепи между основными элементами пары [183], и, следовательно, размыкание цепи термотока при резании является с этой точки зрения невыгодным для обильно смазанных звеньев кинематической цепи станка.

Ситуация, однако, меняется на противоположную, если иметь в виду другую причину возбуждения электрического поля в це-

<sup>1</sup> О случаях обработки точением, сопровождавшихся ужасными вибрациями («видным дрожанием»), сообщается, в частности, в [223].

левом промежутке. Мы говорим о полных разрывах термоэлектрических цепей, находящихся под током, при вибрационных отскоках индентора от элемента, с ним сопряженного. Реализация подобных условий особенно характерна для прерывистого резания. В таких условиях потенциальная возможность электрической микроэрозии поверхностей создается за счет э.д.с. самоиндукции  $\mathcal{E}_L$  наводимой во внешнем термоэлектрическом контуре вследствие его разрыва. Вполне вероятно, что при быстром разрыве контура

$$\mathcal{E}_L = r \frac{\mathcal{E}_I}{R} e^{-\frac{r}{L} \tau} \gg \mathcal{E}_I \quad (5.1)$$

в момент, непосредственно следующий за его началом ( $r \rightarrow \infty$ ;  $\tau \rightarrow 0$ ).

Индуктивность цепи инструмент — станок — деталь определялась по резонансной частоте контура, показанного на рис. 109,

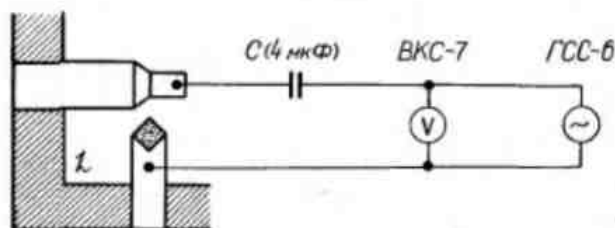


Рис. 109. Колебательный контур для определения индуктивности внешнего контура термоэлектрической цепи

либо с помощью высокочастотного измерителя типа Е12-1. Оказалось, что  $L < 10^{-5}$  Гн. Энергия цепи настолько мала, что ее может принять миниатюрный конденсатор.

Как правило, индуктивность цепей при трении и резании металлов очень мала. Поэтому в обычных условиях, когда в полости фрикционного конденсатора нет высокоомной третьей фазы, искровые разряды маловероятны. Если же они существуют (при наличии в системах трения механических релаксационных колебаний), то блокирование термотоков может оказаться целесообразным по следующим ниже соображениям.

Эрозия тончайших оксидных пленок, выполняющих функцию смазки, освобождает участки поверхности для прямого металлического контакта. Тепло, выделяющееся в узком токопроводящем канале, заставляет материал размягчаться, а иногда даже плавиться. При частом повторении электрического пробоя в районе одних и тех же пятен разрушение металла в процессе его окисле-

ния приводит к луночному износу<sup>1</sup>. Разрушаться могут и пленки органических смазок. Эрозионный процесс как бы затрудняет доступ неэлектропроводной смазочно-охлаждающей жидкости в межфазное щелевое пространство. Если всасывается электролитическая среда, то как проводник второго рода она предотвращает опасную форму разряда. Весьма примечательно, что не только химические (синтетические) жидкости способны ограничить перенапряжения в зоне трения (резания). Частицы эмульсии, например, будучи ионизированными при его распылении, также ослабляют электрическое поле в зазоре между расходящимися контактными площадками (эффект «тумана»).

Заканчивая обсуждение поднятых выше вопросов, следует еще раз подчеркнуть, что не только причина и форма разрядов, но и способы борьбы с ними при трении оказываются совсем различными, иногда взаимно исключающими друг друга.

Как уже отмечалось, влияние термоэлектрических токов на износ режущего инструмента было впервые обнаружено Аксером и Опитцем. Измерения износа твердосплавных резцов по задней поверхности позволяли установить: компенсация термо-э.д.с. при замыкании внешнего контура цепи (резец изолируется от суппорта) могут приводить к повышению стойкости инструмента по сравнению с обычными условиями резания. Согласно [23], вводом в зону резания слабых токов удается регулировать окислительные процессы в местах контакта инструмента со стружкой и изделием, влияя тем самым на интенсивность электрохимического износа режущих кромок. Скорость образования и роста окисного слоя уменьшается, если отсутствует канализация термоэлектрического тока через массу станка.

Автор считает уместным сразу же указать на то обстоятельство, что в известных ему работах Опитца и сотр., опубликованных после Лондонской конференции 1957 года, приведенная здесь точка зрения не развивалась. Больше того, она, в вместе с ней и целесообразность практического использования предложенного метода были поставлены под сомнение, поскольку дальнейшие исследования немецких специалистов показали возможность отрицательного влияния термоэлектрической компенсации на образование покрытий (продуктов химических реакций), тормозящих износ инструмента<sup>2</sup>.

Систематические исследования того влияния, которое оказывают термотоки и вводимые в зону резания токи на интенсивность и характер окислительного износа инструмента, вот уже в течение ряда лет проводятся Рыжковым с сотр. [276, 24, 242, 277 и др.]. Разделяя взгляды Опитца и Аксера, авторы с самого начала руководствовались данными об условиях окисления контактных

площадок при резании (трении) и зависимости смазочной способности окисных слоев от их толщины, состава и свойств [265, 278—280 и др.]. Основополагающим же звеном их рассуждений, опирающихся на теорию высокотемпературного окисления Вагнера [281], является представление об ускорении (при замыкании цепи термотока, согласно подключению источника) или замедлении (при размыкании цепи термотока, встречном подключении источника) миграции катионов металла ( $Fe^{2+}$ ,  $W^{6+}$ ,  $Co^{2+}$  и др.), анионов кислорода и электронов через первичную пленку оксида в результате изменения разности потенциалов (напряженности электрического поля) между ее «катионной» и «анионной» обкладками как за счет внешней э.д.с., так и под действием э.д.с. естественной термопары. Ускоренная диффузия ионов инструментального материала к поверхности раздела *окисел — кислород воздуха* вызывает непрерывный рост толщины окисных пленок и приобретение ими свойств индивидуализированного оксида, который, как известно, гораздо легче удаляется с поверхности металлической подложки. В связи с тем что итогом разрушения этих пленок является обнажение ювенильных поверхностей, в работе [277] предлагается рассматривать термоток в качестве стимулятора адгезионных процессов на контактных площадках, что полностью совпадает с выводом, сделанным автором ранее на основании других теоретических предположений и опубликованных экспериментальных данных [25, 26, 29].

Жилин [282], отмечая, что износ твердосплавного инструмента вызывается одновременным протеканием ряда процессов: механического царапания абразивом, адгезии, коррозии, твердофазной диффузии, контактнореактивного плавления и пластического течения, также затрагивает вопрос о воздействии термо-э.д.с. и внешних токов на коррозионную составляющую интегрального износа, удельный вес которой сильно возрастает при температурах 600—900°C. Специфике газовой коррозии (обработка на воздухе) в условиях протекания термоэлектрических явлений дается объяснение с использованием модели Мотта — Кабрера, но оно мало чем отличается от подхода к вопросу Рыжкова. Что касается особенностей электрохимической коррозии (при резании с СОЖ) в тех же условиях, то их простое перечисление делает нежелательным какое-либо прогнозирование, выходящее за рамки соображений, излагавшихся в предыдущих главах. Наиболее интересным фрагментом работы [282] является, на наш взгляд, объяснение повышенной коррозионной уязвимости сплавов группы ВК по сравнению со сплавами группы ТК, исходя из особенностей их электронного строения. Четкая и очень лаконичная форма объяснения позволяет привести его полностью:

«Изолированный атом кислорода имеет конфигурацию внешних электронов  $s^2p^4$ . При этом он, как правило, по отношению к партнеру по химическому соединению проявляет акцепторные свойства и стремится к образованию стабильной электронной

<sup>1</sup> Этот износ рассматривается вне всякой связи с образованием макроскопических дугов и вылетов на рабочих поверхностях инструмента.

<sup>2</sup> Эти сведения стали известны автору по копии письма В. Кенпа (Ахен, ФРГ), адресованного Р. Г. Марксом.

конфигурации  $s^2p^6$ . Карбиды вольфрама, наряду с высоким статистическим весом атомов со стабильными  $d^6$ -конфигурациями (СВАСК  $d^6$ ), имеют относительно небольшой процент делокализованных электронов, что создает трудности для образования конфигураций  $s^2p^6$  и возникновения прочных химических соединений, препятствующих дальнейшему окислению.

Атомы титана, входящего в композиции сплавов группы ТК, проявляют донорные свойства по отношению к кислороду, образуя с ним прочные соединения с повышенным СВАСК  $s^2p^6$ , препятствующими диффузии атомов металла и кислорода через пленку и снижающими, таким образом, интенсивность окисления.

Это предположение кажется весьма логичным и обоснованным, чего нельзя пока сказать о попытке автора связать влияние термо- э.д.с. и внешних токов на интенсивность коррозионных процессов с «принципиальной зависимостью» формирования электронных конфигураций от напряженности электрического поля как результата суперпозиции полей.

Возможность существенного влияния термотока на скорость окислительного износа инструмента отрицается Бобровским [109], проводившим специальные опыты по фрезерованию на небольшую глубину стали 18Х2Н4ВА цельной цилиндрической фрезой большого диаметра из быстрорежущей стали Р18. Убедившись в том, что эффект электрической изоляции инструмента имеет место, и полагая, что длительное пребывание зубьев фрезы на воздухе не позволило бы заметить эффект, будь он обусловлен снижением окислительного износа вследствие размыкания цепи термотока, автор пришел к несогласию с развиваемой Рыжким гипотезой.

Нетрудно видеть, что в данном случае Бобровский противоречит сам себе. Специально создав такие условия, в которых влияние термотока на интенсивность окислительного износа завуалировано, автор использует это же обстоятельство для отрицания указанного влияния, считавшегося объектом его исследования. По нашему мнению, результаты экспериментов Бобровского позволяют с уверенностью говорить лишь о существовании других причин разрушительной функции термотока, независимо от рассмотренной выше.

Вряд ли можно согласиться и с замечанием Бобровского о неправомерности моделирования процесса окисления, «могущего иметь место при резании, окислении в печи» [109]. В пользу такого моделирования (к нему, в частности, прибегали Онитц, Аксер и Рыжкин) говорят данные о подобии фазового состава поверхностного слоя-трущих образцов составу образовавшихся на них окислов после нагревания этих образцов в печи до той же температуры [283] (данные получены при исследовании окисления фрикционных материалов методом высокотемпературной рентгенодифрактометрии в диапазоне температур 20—1100°C).

Как представляется автору, вмешательство термотока в процесс окисления инструмента может действительно оказаться активным и значимым, если одним из ведущих видов износа при резании является износ окислительный. Наиболее убедительным тому подтверждением мы считаем опыты, показавшие отсутствие какого-либо влияния электрических явлений на стойкость и шероховатость поверхности при резании в среде инертного газа (аргона), исключившей возможность появления окисных пленок [227].

Теперь мы обратимся к концепциям, касающимся роли электрической диффузии в износе режущего инструмента.

Объяснить разрушительную функцию термотока при резании именно с точки зрения вызываемого этими токами переноса массы вещества, т. е. электропереноса, впервые попытался Хеенкамп [27]. Ссылаясь на отсутствие опубликованных данных по электродиффузии в твердых сплавах и, тем более в окисных слоях, возникающих на них при резании, автор считает возможной встречную миграцию частиц, относящихся к различным компонентам твердого сплава. В результате такой миграции изменяются, например, концентрации углерода, вольфрама и кобальта, что сразу же отражается на механических свойствах сплава. Согласно [27], электродиффузионный износ инструмента должен протекать особенно интенсивно как раз в тех местах, где плотность термоэлектрического тока достигает наибольших значений. Чтобы оценить масштабы переноса массы, связанного с направленной миграцией ионов, образующих остов кристаллической решетки, в электрическом поле, автор предлагает пользоваться следующей формулой, выражающей объем  $V$  перенесенного вещества при протекании термоэлектрического тока  $I_t$  в течение времени  $t$ :

$$V = BI_t t, \quad (5.2)$$

Коэффициент  $B$ , характеризующий скорость электропереноса при данном токе, имеет, по сугубо ориентировочным подсчетам Хеенкампа, значение  $\sim 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/А·с, причем и это получившееся малым значение является завышенным, по признанию самого же автора.

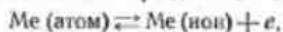
Не обнаружив разницы в износе изолированного и неизолированного твердосплавных резцов при точении сталей и установив, что при работе станка его сопротивление повышается до 200—1000 Ом, Хеенкамп пришел к выводу, что такое сопротивление внешнего контура при действующей в нем термо- э.д.с.  $\sim 10$  мВ равносильно электрической изоляции и, стало быть, если следовать (5.2), размыканием термоэлектрической цепи с протекающим в ней слабым током эффекта добиться нельзя. Вместе с тем Хеенкамп не отказался от выдвинутой им гипотезы о возможности дополнительного износа инструмента вследствие электропереноса, ибо, по его мнению, «чисто электрический» износ становится реальностью в условиях протекания сильных термотоков

короткого замыкания, локализованных в непосредственной близости к поверхности раздела, через которую они циркулируют. Изменением величин и характера распределения внутренних термо-токов автор и пытается объяснить повышенные стойкости инстру-мента, наблюдавшиеся им при подключении постороннего источника к зоне резания.

Фактически на той же физической основе строит свои рассу-ждения автор работы [109], с той только разницей, что представ-ление о перераспределении компонентов взаимодействующих тел в электрическом поле, которое «может привести к ослаблению структуры инструментального материала и к созданию более бла-гоприятных условий для его механического разрушения», распро-страняется Бобровским и на внешний термоэлектрический кон-тур, где, по его же данным, рабочие токи исчисляются, как правило, миллиамперами. Помимо общих и в большинстве своем известных положений, заимствованных из многочисленных работ по исследованию диффузии в простейших бинарных системах, автор не приводит ни одного прямого доказательства правильности своих тезисов, ссылаясь на ограниченные возможности совре-менного эксперимента и недооценивая, как нам кажется, метод меченых атомов (авторадиографии). Попробуем и мы обратиться к данным, полученным при исследовании электродиффузии в двойных сплавах, имея, конечно, в виду, что любая количест-венная оценка служит в данном случае инструментом лишь чисто качественного анализа.

Известно, что в твердых растворах, находящихся в постоян-ном электрическом поле, наиболее высокой подвижностью обла-дают атомы углерода. В железоуглеродистых сплавах все эти атомы находятся в ионизированном состоянии, и под действием пондеромоторных сил, к тому же увлекаемые электронным вет-ром, они фронтом перемещаются по направлению к катоду, стре-мясь целиком уйти из анодной области [284]. Смещение радиоак-тивной науглероженной зоны без нарушения ее симметрии наблю-далось при электропереносе углерода в железе, никеле, кобальте, титане, тантале и вольфраме [285]. Однако, как это следует из работы [286], оценка величины такого смещения, происходящего в течение нескольких часов при температуре  $\sim 1000^\circ\text{C}$ , приводит к значениям порядка  $10^{-5}$  мм.

Парциальные скорости электропереноса составляют (в см/с):  $\sim 10^{-8}$  — хрома в сплаве Ni—Cr при температуре  $950\text{--}1100^\circ\text{C}$  [287];  $\sim 10^{-8}\text{--}10^{-7}$  — серебра и цинка в сплавах Ag—Zn при  $550^\circ\text{C}$  [288];  $\sim 10^{-7}\text{--}10^{-6}$  — вольфрама и железа в твердом рас-творе вольфрама в железе при  $900\text{--}1150^\circ\text{C}$  [289]. Независимо от того, в какой мере эти скорости связаны с миграцией ионов, об-разовавшихся при диссоциации атомов по схеме



а в какой — с движением нейтральных атомов, в которые снова

превращаются ионы, остававшиеся очень недолго в положении электронных ловушек, приведенные данные отнюдь не убеждают нас в том, что в ослаблении структуры материала режущей кро-мки электродиффузия, ликвидируемая размыканием цепи инстру-мент — деталь — станок, может составить серьезную конкурен-цию термодиффузии, хотя первая и осуществляется в силовом поле, а вторая является свободной. Скорее напрашивается вывод, сделанный Аваковым и Маркосян на основании еще более под-робного обсуждения вопроса<sup>1</sup>: «...резец выйдет из строя из-за механического износа значительно раньше того периода, который необходим для того, чтобы хоть самым незначительным образом сказалось участие «чисто» электрического износа как доли его общего износа».

Хотелось бы к тому же подчеркнуть, что контактные электри-ческие поля на границе раздела фаз могут не только способство-вать, но и препятствовать диффузионному переносу вещества [69]. Диффузия, какую бы природу она ни имела, затрудняется при трении и резании непрерывным изменением числа и распре-деления контактных пятен, где возникают металлические связи. Что касается инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали, то, по мнению Лоладзе [240], он практически не подвер-гается диффузионному износу, поскольку предельная температу-ра его формоустойчивости ниже температуры, при которой начи-нается заметная диффузия.

Все сказанное не означает, однако, что автор игнорирует роль электродиффузионных процессов в износе режущего инструмен-та. Наоборот, как это предполагается в опубликованных им рабо-тах [26, 29], указанные процессы могут предопределять проч-ность когезионного шва между инструментом и обрабатываемой деталью со всеми вытекающими отсюда последствиями. Но под-робнее с гипотезой автора читатель познакомится в следующем параграфе.

Разговор о термоэлектрическом охлаждении инструмента, вызванном протеканием относительно слабых токов через зону взаимодействия металлов<sup>2</sup>, следует начать с разграничения суще-ствующих представлений о роли явления Пельтье при резании на ошибочные и верные (по своей физической основе).

Галей [291], добившись приблизительно двукратного повы-шения стойкости сверл из стали Р18 при обработке стали 45 пу-тем ввода в зону резания внешнего тока, противоположного по направлению термотоку (естественному), и получив такой же результат в процессе истирания быстрорежущих вольфрамовых и молибденовых сталей, объяснил наблюдаемые им эффекты от-водом тепла из зоны взаимодействия — переносом тепла с инст-румента на изделие за счет эффекта Пельтье.

<sup>1</sup> В рукописи «Исследование влияния термоэлектрических и термомангнит-ных явлений на изнашиваемость и стойкость резцов». Ленинград, 1972.

<sup>2</sup> В печати этот вопрос был впервые поднят М. Т. Галеем [290].



Бобровский [109], пытаясь выяснить, в какой мере охлаждение, «являющееся следствием явления Пельтье», способно повлиять на повышение стойкости, полностью разделяет мнение Галя о нагревании (охлаждении) инструмента током при согласном (встречном) подключении источника. На этой основе он и строит все свои рассуждения, касающиеся роли явления Пельтье при резании, сравнивая, в частности, способность «метода разрыва цепи термотока», «компенсационного метода» и «метода протivotока» обеспечить выигрыш в стойкости инструмента благодаря вызываемому этими мерами поглощению тепла Пельтье в области контактных площадок.

Одна из гипотез «о физической природе влияния термотока на основные показатели процесса трения и резания», с точки зрения которых Дубров и сотр. [227] анализируют экспериментальные данные, сформулирована ими следующим образом: «Термоток, протекающий в контакте инструмент — деталь, является причиной дополнительного тепла, выделяемого в контакте, в результате чего снижается стойкость инструмента». Далее авторами прямо указывается, что под этим дополнительным теплом имеется в виду тепло Пельтье, причем совершенно не ставится под сомнение сама возможность проводимого в работе обсуждения дополнительного охлаждения горячего спая за счет разрыва цепи термотока, усиления этого охлаждения вводом протivotока и т. п.

По-видимому, под влиянием работ Дуброва тех же исходных позиций придерживается Шульга [292].

Нет необходимости доказывать, что авторами работ [291, 109, 227, 292] была неправильно понята сущность проявления эффекта Пельтье при резании (трении), и мы опускаем обсуждение результатов, полученных с привлечением представлений, противоречащих второму началу термодинамики. В то же время можно указать на серию исследований, отличающихся от упомянутых здесь работ прежде всего корректным подходом к постановке самой задачи [293, 241, 228, 294, 295, 236 и др.].

Тюшевым [293] проанализирована возможность ограничения роста и стабилизации температуры при трении с помощью естественного термоэлектрического охлаждения за счет эффекта Пельтье. Найдены значения коэффициента Пельтье  $P$  ( $10^{-3}$  Дж/Кл) для различных пар материалов: сурьма ← свинец — 0,8; медь ← алюминий — 1,7; медь ← свинец — 2,4; сталь 55 → медь — 2,8; свинец ← константан — 9,2; константан → медь — 11,0; сталь ← константан — 12,0; висмут → медь — 16,0; свинец ← висмут — 21,5; сурьма ← висмут — 45,0; сталь ← графит — 150,0 (стрелками указано направление тока, при котором контакт охлаждается). Рассмотрены основные принципы термостатирования в графито-металлических контактных парах, где, как показали экспериментальные данные, термоэлектрические явления могут наиболее эффективно снижать температуру трущихся поверхностей и спо-

собствовать длительной работе фрикционной пары без применения смазки.

Авторами работы [241] изучалось влияние термотока на стойкость цельных быстрорежущих резцов из стали Р18 при продольном точении стали Ст3 в среде кислорода и на воздухе. В качестве внешнего источника использовалась хромель-алюмелевая термопара, нагретая таким образом, чтобы ее э.д.с. составляла 14—16 мВ. Результаты стойкостных испытаний подтвердили тесную взаимосвязь проявления термоэлектрических эффектов с влиянием среды, в которой происходит резание, и со свойствами образующихся пленок оксидов. Как было зафиксировано при резании в среде кислорода, подключение внешнего источника, согласное (встречное) с естественной термопарой *резец — заготовка*, может привести к значительному повышению (понижению) стойкости, при этом пик последней сдвигается в сторону более высоких (низких) скоростей резания. Авторы пришли к физически оправданному заключению, что отмеченный результат объясняется понижением (повышением) температуры контакта интенсивно окисляемых поверхностей реза и стружки за счет эффекта Пельтье. Сделан также следующий важный вывод, оставшийся, к сожалению, не подкрепленным хотя бы простейшими расчетами: «Часть теплового потока, обусловленная наличием термоэлектрического тока<sup>1</sup>, весьма значительна, и от его направления может в значительной мере зависеть тепловое поле в инструменте и его стойкость».

Эта серия опытов Якунина с Якубовым была подвергнута критике Бобровским и Афанасьевым [220] якобы на том основании, что без учета внутреннего сопротивления *хромель-алюмелевой* термопары и сопротивления термопары *резец — деталь* нельзя судить о степени «компенсации термотока в зоне резания». Рассматривая электрическую цепь, образованную двумя встречно включенными источниками с э.д.с.  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  и внутренними сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$ , авторы полагают, что при равенстве  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  условием «взаимной компенсации по току» ( $I_1 = I_2$ ) является равенство внутренних сопротивлений источников. Если  $r_1 \neq r_2$ , то, по их мнению,  $I_1 \neq I_2$ , так как  $I_1 = \mathcal{E}_1 / r_1$ , а  $I_2 = \mathcal{E}_2 / r_2$ .

Как видим, авторы [220] неправильно применяют метод контурных токов. Действительно, поскольку протекание тока возможно лишь в случае замкнутой цепи,  $I_1 = \mathcal{E}_1 / (r_1 + r_2)$

и  $I_2 = \mathcal{E}_2 / (r_2 + r_1)$ , т. е.  $I_1 = I_2$  при  $r_1 \neq r_2$ . Иначе и не должно быть при встречном включении источников с одинаковыми по величине э.д.с.: никакого результирующего тока протекать в этом случае не может, независимо от различия вольтамперных характеристик самих источников. Следует, кстати, заметить, что с фи-

<sup>1</sup> Здесь по-прежнему имеется в виду подключение внешнего термоэлектрического источника. (Прим. авт.)

этической точки зрения гораздо логичнее и правильнее говорить не о компенсации токов, а о компенсации напряжений. Термин «компенсация по току», которым иногда пользуются при расчетах электрических цепей с помощью обычных электротехнических приемов, весьма условен — он не отражает физическую суть явления компенсации. Это еще более подчеркивает несостоятельность критических замечаний, высказанных Бобровским и Афанасьевым в адрес работы [241].

Очень важным моментом, отмечаемым в работах Якунина и сотр., является предложение учитывать не только разрушительную, но и созидательную функцию термотока, подтвержденную экспериментальными фактами. Возможность рассмотреть эти факты как проявление эффекта Пельтье отчасти убеждает нас в правильности допущения целесообразности применения метода ГЛО и его частного варианта — размыкания цепи термотока в определенных условиях резания.

Согласно [228], тепловое действие термотока, от которого зависят свойства эластичирующих пленок, проявляется себя по-разному в зависимости от так называемых температурно-скоростных условий резания. Дело в том, что с увеличением скорости резания температура на контактных площадках автоматически возрастает из-за более интенсивного протекания процессов пластической деформации. Поэтому, как полагают авторы, она может превзойти величину, оптимальную с точки зрения реализации условий, в которых влияние термоэлектрических явлений на стойкость инструмента оказывается особенно ощутимым. По данным работы [296], «для сохранения эффекта повышения стойкости в среде кислорода при переходе из одного диапазона скоростей резания в другой подача должна быть изменена так, чтобы произведение скорости резания на подачу оставалось постоянным». В качестве примера воспроизведения условий, благоприятных для проявления эффекта, авторами работы [228] рассматривается переход при продольном точении стали 45 резцом из Р18М от одних режимов ( $v=104$  м/мин;  $s=0,1$  мм/об) к другим (80 м/мин; 0,13 мм/об), определяемый правилом  $v \cdot s \approx \text{const}^1$ . Подключение хромель-алюмелевой термопары (э. д. с.  $\sim 15$  мВ) таким образом, чтобы искусственный термоток совпадал по направлению с естественно возникающим, привело к заметному увеличению стойкости инструмента, выражаемому соответствующими значениями  $K_{\text{ст}}$ , как до, так и после перехода ( $\sim 2,3$  и  $\sim 1,5$ ).

Доводы работы [228], согласно которым действие термотоков на стойкость связано с тепловыми явлениями, в какой-то мере подтверждаются результатами исследования [297]. Если подключение постороннего источника действительно изменяет температуру на трущихся поверхностях, то в зависимости от того, способствует или нет такое изменение приближенно к токоурав-

тельным температурно-скоростным условиям резания, ожидалась различная эффективность действия термотоков. Все так и случилось, когда авторы стали искусственно создавать условия с разной начальной температурой на контактных площадках, варьируя передним углом инструмента  $\gamma$  (в пределах от 0 до  $35^\circ$ ). Влияние тока, вводимого в зону резания от внешнего источника, оказалось особенно сильным при некотором  $\gamma = \gamma^*$  ( $\sim 25 \div 27^\circ$ ) и значительно менее ощутимым при  $\gamma < \gamma^*$  и  $\gamma > \gamma^*$ . Поскольку качественно аналогичные результаты наблюдались в опытах с применением различных сред (воздух, кислород), авторы пришли к заключению, что в определенных условиях резания именно тепловое действие термотоков может быть преобладающим и приводить к существенному изменению стойкости инструмента с передним углом  $\sim \gamma^*$  за счет хотя бы незначительного изменения температуры.

Нетрудно заметить, что изложенный здесь подход вплотную соприкасается с гипотезой Макарова [298] об оптимальной температуре резания для конкретного сочетания инструментального (твердосплавного) и обрабатываемого (конструкционного) материалов, инвариантной по отношению к режимам резания, геометрии инструмента и другим внешним условиям.

Ладакина и Гуфан [295] своевременно заострили вопрос о верхней границе мощности термотока, выделяемой в зоне контакта *инструмент — деталь*, подчеркивая в то же время очевидное для установившихся процессов преобладание тепла Пельтье, уносимого во внешний контур термоэлектрической цепи, над энергией Ленца — Джоуля. Как полагают авторы, очень малые значения мощности, развиваемой естественным источником термо- э.д.с. в зоне резания ( $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$  Вт), говорят о необходимости привлечения «каких-то совершенно специфических механизмов» для объяснения влияния термотоков на износ режущего инструмента.

Чтобы дать экспериментально обоснованный ответ на вопрос о роли естественного термоэлектрического охлаждения зоны резания, Аваков и Маркосян [236] воспользовались обходным методом решения задачи, состоящим в сравнении износа двух идентичных, симметрично работающих резцов, к которым подключался внешний источник э.д.с. (рис. 110). Полная симметрия встречно включенных термоэлементов, образованных каждым из резцов с деталью, предварительно контролировалась милливольтметром, приме-

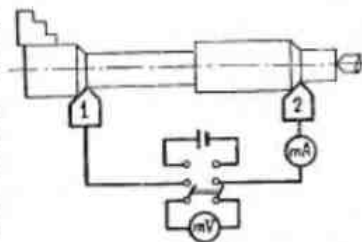


Рис. 110. К выяснению роли эффекта Пельтье в естественном термоэлектрическом охлаждении зоны резания (по А. А. Авакову и Р. Г. Маркосян)

<sup>1</sup> Резание осуществлялось на воздухе.

няемым в качестве нуль-индикатора. Опыты показали, что разное направление тока по отношению к границам раздела фаз в обеих контактных зонах не вызывает различия в износе пластинок марки ВК8 при обработке титанового сплава ОТ4, когда ток варьируется в пределах от 0,05 до 0,2А ( $v=122,5$  м/мин;  $s=0,1$  мм/об;  $t=0,5$  мм). Значит, независимо от того, выделяется или поглощается тепло Пельтье на контактных площадках инструмента, это не имеет существенного значения в данных условиях резания.

По нашему мнению, предпринятая авторами попытка может считаться безукоризненной в методическом плане только по отношению к стационарным процессам. Она не вносит ясности в картину, отражающую взаимосвязь тепловых и электрических эффектов при резании в условиях неизбежных динамических явлений, фактически предопределяющих характер износа инструмента, о чем мы еще будем говорить подробнее.

Заканчивая обзор, автор вынужден коснуться одного досадного обстоятельства, которое затрудняет восприятие некоторых появляющихся в печати работ. Речь идет о неаккуратном обращении с физической терминологией, примером чего могут служить хотя бы следующие выдержки:

— «При резании металлов... возникает термоток  $I_t$ , причиной которого является результирующая сила  $E_t$ . Эту термо-э.д.с. образуют термоэлектрические, термомагнитные, гальваномагнитные эффекты и термоэлектронная эмиссия...» [220]<sup>1</sup>;

— «К адсорбционным явлениям при трении металлических тел могут быть отнесены термоэлектрические явления» [299];

— «Вследствие того, что термотоки являются замкнутыми и центры их вращения расположены вокруг определенных точек, то и генерируемые ими магнитные поля оказываются замкнутыми» [300].

Как видим, простое искажение физического смысла привело авторов последней выдержки к принципиально неверному объяснению топологии вихревого (магнитного) поля.

В ряде работ встречается определенный произвол при введении нерасшифрованных или даже сомнительных понятий наподобие «термоэлектропроводность материала», «удельная напряженность магнитного поля» и др. (см., например, [291]).

Перейдем теперь к более подробному изложению взглядов автора на существо и специфику процессов, обуславливающих непосредственную связь термоэлектрических явлений при трении (резании) с механизмом разрушения металлов и сплавов, находящегося в контактом взаимодействии.

<sup>1</sup> Простое смешение понятий, таким образом не адекватное представлению о магнитотермоэлектричестве в магнитотермо-э.д.с., относящихся к полуметаллам, обнаруженным при температурах намного ниже нуля по Цельсию ряд особых свойств благодаря своей уникальной зонной энергетической структуре.

## § 2. Термоток как стимулятор схватывания и диффузионного спекания материалов

Согласно [25, 26, 29], представление о бросках термотока, происходящих, как правило, неорганизованный характер, естественно связывать с идеей скачкообразного преодоления энергетического порога схватывания. Мы имеем в виду гипотезу схватывания Семенова [301—305], выраженную таким образом, как это было сделано самим ее автором, а не в том плане, как она была воспринята или даже неправильно истолкована в некоторых других работах.

По мнению Семенова, для осуществления процесса схватывания металлов им необходимо сообщить некоторую энергию активации, которая черпается из работы пластической деформации. Сравнивая границу раздела, получаемую в результате кристаллизации из жидкого состояния или рекристаллизации, с границей, образующейся при схватывании одноименных металлов, автор отмечает [303], что последняя обладает более высокой энергией, и подкрепляет свою мысль выдержкой из работы Смита [306]: «...переход из одной структуры в другую не может осуществляться, если атомы не приобретут добавочную энергию  $W_a$ , называемую энергией активации. При полиморфных превращениях этот энергетический барьер достаточно высок».

Такая точка зрения представлялась и представляется нам правдоподобной. Вряд ли можно согласиться с мнением Лихтмана [307] о вспомогательной роли пластической деформации, заключающейся лишь в создании условий для появления и развития ювенильных контактных площадок, когда само схватывание якобы вполне обеспечивается убылью свободной энергии поверхности, сопровождающей этот процесс.

Как полагают автор, даже в идеальном вакууме, когда мы полностью избавлены от окислов и сорбированных пленок, экранирующих поля свободных валентностей и препятствующих проявлению молекулярных сил сцепления, процесс образования новых металлических поверхностей, являющихся двумерно-протяженными дефектами, неизбежно сопряжен с резким изменением их энергетического состояния под влиянием внутреннего давления электронного газа. Объединение «распираемых» этим давлением атомных систем, к тому же с различно ориентированными решетками, и облегчается механотермической активацией.

С другой стороны, мы, конечно, не собираемся оспаривать, что работа деформации может значительно превосходить энергию активации, необходимую для преодоления энергетического порога схватывания [308]. В зависимости от специфики взаимодействия тел выделение и поглощение энергии в контактных микрообъемах идет по различным каналам, стимулируя не только схватывание, но и диффузию, двойникование, фазовые превращения и другие атомные перестройки, имеющие термофлуктуацион-

ную природу; при этом особенно важно, что не только в указанных вторичных процессах, а скорее даже в первичных актах деформации и разрушения металлов, непосредственно связанных с эволюцией их дефектной структуры, термическим флукуациям принадлежит решающая роль [309—311]. С этих позиций, кстати, довольно легко объясняется физическая картина производительного терморезания труднообрабатываемых материалов (резание металлов в нагретом до высоких температур состоянии [312]), особенно эффективного при использовании минералокерамики.

Внешним проявлением схватывания служат задиры и перенос материала в трущихся парах. С помощью электронного зонда было обнаружено [313], что примерно 85% контактной поверхности инструмента может оказаться под тонким слоем обрабатываемого материала, в котором происходят структурные преобразования.

Как замечает Айнбиндер [314], пары из легко сваривающихся разнородных металлов различной твердости «обладают, как правило, несравненно лучшими антифрикционными свойствами, чем пары из любых одноименных металлов». Однако и здесь мы не видим никакого противоречия, коль скоро говорим о целесообразности комплектовать фрикционные системы, и в том числе пару *инструмент—деталь*, по признаку явного несоответствия химических потенциалов металлов с целью обеспечения пластификации поверхностного слоя одного из элементов, находящихся в контактом взаимодействии (гл. I, § 5). Представление об электронном механизме пластифицирования находящихся в контакте тел снимает также всю загадочность с вопроса, почему в результате ранжирования основных свойств металлов при оценке их обрабатываемости резанием наиболее информативным свойством оказалась работа выхода электрона [315].

Процесс образования прочной связи между разнородными веществами разделяется авторами работы [316] на две стадии: подготовительную стадию сближения в процессе совместного пластического деформирования, за счет поверхностного диффузионного перемещения атомов и пр., когда первостепенная роль отводится процессам электростатического взаимодействия частиц, и приводящую к появлению прочного соединения конечную стадию, в течение которой определяющая роль принадлежит квантовым процессам электронного взаимодействия. Независимо от того, сводятся ли эти квантовые процессы к образованию металлической связи (чистые металлы, твердые растворы), прочной связи ковалентного типа (контакт металла с металлом, полупроводником, интерметаллидом и т. п.), координационно-ковалентной связи (например, между донорными и акцепторными оксидами) и т. д., их протекание требует активации состояния поверхностей энергией определенной величины, сообщаемой в виде тепла (термическая активация), энергии упруго-пластической

деформации (механическая активация) либо за счет различных видов облучения (радиационная активация).

Как видим, «энергетическая гипотеза схватывания» Семенова уточнена и развита на базе современных квантомеханических представлений.

Важными для нас моментами, отмеченными в работе [316], являются соображения о сильных акцепторных свойствах титана, которыми он обладает благодаря наличию двух недостроенных электронных оболочек, а также то обстоятельство, что вероятность захвата атомными остатками чужих связей (в условиях, когда образование парноелектронных связей происходит вследствие трансляции валентных связей) повышается, если значительная часть химических связей претерпевает обрывы со стороны обоих контактирующих веществ в течение ограниченных отрезков времени.

Теперь мы вплотную подошли к вопросу об участии термотоков в актах схватывания металлов при трении (резании).

Напишем уравнение термоэлектрического энергетического баланса для внешнего контура при установившемся режиме фрикционного взаимодействия:

$$I_1^2 R_m - \alpha T_1 I_1 + I_1^2 R_0 + \alpha T_2 I_1 = 0. \quad (5.3)$$

Здесь  $I_1^2 R_m$  — тепло Джоуля—Ленца, выделяемое в горячем спае с температурой  $T_1$ ;  $\alpha T_1 I_1$  — поглощаемое здесь же тепло Пельтье ( $\alpha T_1 = \Pi_1$ );  $I_1^2 R_0$  и  $\alpha T_2 I_1$  — выделяемые в холодном спае тепло Джоуля—Ленца и тепло Пельтье ( $\alpha T_2 = \Pi_2$ ).

В зависимости от величины  $R_0$  то большая, то меньшая часть тепловой энергии (работы деформации) превращается в энергию электрическую. При колебаниях  $R_0$  возникают релаксационные термоэлектрические процессы, которые наряду с упруго-пластическими деформациями и диспергированием ответственны за непрерывно происходящие в контактных микрорежимах выделение и поглощение энергии. Следствием бросков термотока при резких спадах  $R_0$  является быстрая перекачка энергии от горячего спае к холодному, которая отражает стремление системы к выравниванию температур  $T_1$  и  $T_2$  и снижению силы тока. Внешний контур (станок) по отношению к горячему спаю (зоне резания) играет роль термоэлектрического радиатора. Мы встречаемся здесь с весьма наглядным подтверждением принципа Ле-Шателье, согласно которому любое внешнее воздействие, выводящее систему из равновесия, стимулирует в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия [317].

В связи со сказанным хотелось бы заметить, что фрикционная пара вообще довольно часто оставляет впечатление «думающей» системы, поведение которой свидетельствует о том, что она пытается перейти в состояние наименьшего потребления энергии (минимального возмущения) либо путем приспособления к ха-

рактору внешнего воздействия, либо даже ценой своего разрушения как своеобразного протеста против несоизмерных для нее нагрузок и скоростей.

Если рассматривается случай обработки металлов резанием, мы можем считать, что условные нагреватель и холодильник обладают бесконечно большой теплоемкостью, причем  $T_1 \gg T_2$ . Тогда

$$Q_{\text{П}} = \alpha T_1 I_t \approx \frac{\xi_t^2}{R_m + R_0}; \quad (5.4)$$

в то же время

$$Q_{\text{Д}} = I_t^2 R_m = \frac{\xi_t^2 R_m}{(R_m + R_0)^2}. \quad (5.5)$$

Понятно, что  $Q_{\text{П}} > Q_{\text{Д}}$ , а поглощаемое в горячем спае количество тепла  $Q_1 = Q_{\text{П}} - Q_{\text{Д}}$  будет зависеть от соотношения сопротивлений станка и зоны резания, как это показано на рис. 111.

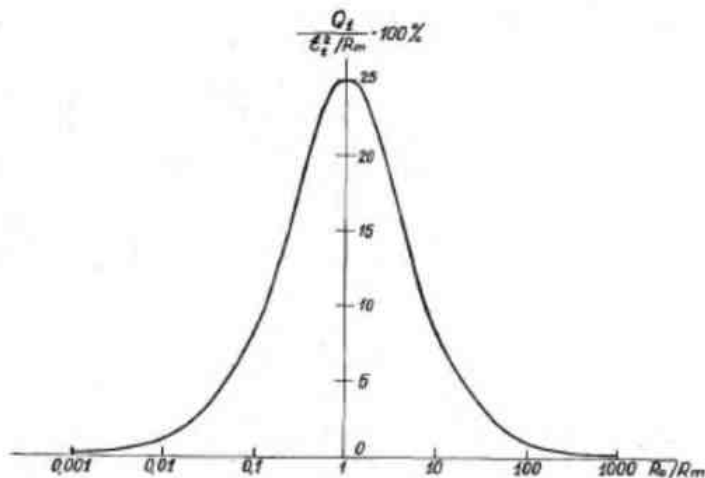


Рис. 111. Влияние отношения нагрузочного сопротивления термовары инструмент — деталь к ее внутреннему сопротивлению (логарифмический масштаб) на относительное количество тепла, уносимое из зоны резания в процессе ее естественного термоэлектрического охлаждения. Мощность короткого замыкания термовары ( $\xi_t^2/R_m$ ) принята за 100%

Нетрудно видеть, что колебания сопротивления станка вызывают дополнительные колебания температуры на контактных

площадках инструмента в окрестностях значения  $T_1$ , т. е. специфическую флуктуацию температуры, которая должна придавать тепловому движению атомов еще более неравномерный характер, выражающийся в энергетических (тепловых) флуктуациях. В этих условиях увеличивается, как естественно предположить, вероятность захвата чужих связей в результате квантовых процессов взаимодействия электронных оболочек атомов. Энергетические флуктуации постоянно изменяют конфигурации эквипотенциальных поверхностей внешних молекулярных полей взаимодействующих конденсированных фаз. Чем чаще и разнообразнее такие изменения, тем больше шансов надеяться на возможную близость указанных конфигураций, совпадение которых мы и считаем основным признаком исчезновения границы раздела между кристаллическими решетками. Стало быть, термоэлектрический ток, а точнее релаксационные процессы, связанные с его протеканием при  $R_0 = \text{var}$ , стимулируют акты схватывания.

Еще более значительная роль принадлежит подобным релаксационным процессам во внутренних термоэлектрических контурах, не допускающих, к сожалению, в силу своих микроскопических размеров, инструментального вмешательства извне. Для одного из совокупности сравнительно сильных локальных термоток вихревого характера, протекающих, например, непосредственно в зоне резания, уравнение (5.3) примет вид

$$I_t^2 r_t - \alpha T_1 I_t + I_t^2 r_k + \alpha T_2 I_t = 0. \quad (5.6)$$

В то время как процессам, имеющим место во внешнем термоэлектрическом контуре, соответствует лишь правая ветвь кривой, показанной на рис. 111 ( $R_0/R_m > 1$ ), релаксационные процессы во внутренних контурах описываются обеими ветвями аналогичной кривой. Переходы через флуктуирующий максимум такой кривой (от  $r_k/r_t < 1$  к  $r_k/r_t > 1$ ) фактически означают, что горячий и холодный спаи меняются местами (после промежуточного выравнивания температур  $T_1$  и  $T_2$ ).

Произведем ориентировочную оценку тепловой мощности, выделяемой локальным термоток в холодном спае. Если положить  $r_t = r_k \sim 1; 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001$  Ом, то соответствующие значения  $Q_2 = Q_{\text{П}} + Q_{\text{Д}}$  при  $T_1/T_2 \sim 2$  и  $\xi_t \sim 1$  мВ окажутся примерно равными:  $10^{-6}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$  Вт. Кажется бы, это очень малые значения. Если учесть, однако, что мощность порядка  $10^{-4} \div 10^{-2}$  Вт выделяется в очень малых контактных микрообъемах, тепловым действием термоток, приводящим к возрастанию температуры и размягчению контактных пятен, уже пренебрегать нельзя. Удельная мощность термотока (на  $\text{мм}^2$ ) может составлять несколько ватт, а это уже вполне ощутимая величина, достаточная, по нашему мнению, для термической активации схватывания. Вихревые петлеобразные термотоки могут способствовать локальным пластическим деформациям именно на тех микроскопических участках поверхности, где еще не преодолен

энергетический барьер. Благодаря термоэлектрическим релаксационным процессам на многократное передеформирование выступов шероховатостей накладываются термические циклы, вызывающие «адгезионную атаку»<sup>1</sup>. Как раз в таких условиях и может происходить лавинное образование «мостиков сварки»<sup>2</sup>, являющиеся причиной заеданий при скольжении.

Надо полагать, что резкие колебания сопротивления контактных пятен самым тесным образом связаны с процессами окисления трущихся поверхностей и свойствами образующихся на них пленок. Экралирующие пленки окислов, предохраняющие поверхности от схватывания, весьма сильно отличаются по своим электрическим свойствам (см. рис. 44), механическим свойствам (твердость, хрупкость) и, что особенно важно, по характеру адгезионной связи с подслоем и степени приспособленности к кристаллическому рельефу его поверхности [318]. Разрыв окислов в локальных областях стягивания является как бы своеобразным коротким замыканием термоэлектрического источника на металлические  $\alpha$ -пятна с малым сопротивлением. Здесь особенно велика плотность термотока и оказывается сосредоточенной как энергия Пельтье, принесенная от горячего пятна, где только что произошла температурная вспышка, так и энергия Джоуля—Ленца. В свою очередь, термоток способствует «залечиванию» поврежденного окисла, влияя на механизм и скорость роста вновь образующейся пленки.

Внешний и внутренние контуры термоэлектрической цепи являются связанными. Поэтому обесточивание внешнего контура приводит к перераспределению термотоков во внутренних контурах, что не может не отразиться на условиях контактного взаимодействия и интенсивности разрушения трущихся тел. В этом и кроется, вероятно, одна из причин изменения формы площадок износа задних поверхностей сверл, неоднократно наблюдавшегося различными авторами после замыкания термоэлектрического контура *инструмент — деталь — станок*.

Из представления о хаотических бросках термотока вытекает [29], что при обработке металлов резанием процесс переноса диффузанта за счет электронно-дырочного увлечения активированных ионов протекает неравномерно. Это обстоятельство, вероятно, имеет существенное значение независимо от того, каков механизм влияния электродиффузии на износ режущего инструмента: вызывает ли «отсос» мигрирующей примеси ослабление структуры инструментального материала [28, 109] или «вспрыск» диффузанта через условную границу раздела между решетками<sup>3</sup> приводит к свариванию поверхностных слоев [26]. Автор полагал, однако [29], что при наличии флуктуаций электрического поля, могущих как бы рывком изменить плотность диффузионно-

го потока в несколько раз, последнее предположение в особенности не лишено эвристического потенциала. Теперь мы можем говорить об этом еще более уверенно. Изложенные выше представления о таких масштабах электропереноса массы, которые явно недостаточны для того, чтобы выделять электродиффузионное ослабление структуры инструментального материала как особый вид износа (см. § 1), почти не оставляют сомнений в том, что правильнее акцентировать внимание не на электродиффузионном износе как таковом, а на «порывах» электронно-дырочного «ветра» как на одной из основных причин упрочнения адгезионного шва и, следовательно, когезионного износа. Речь идет, стало быть, не только о тепловых, но и об электрических флуктуациях, благодаря которым мы и рассматриваем термоток в качестве стимулятора диффузионного спекания материалов.

В свете представлений о влиянии термотоков на деформационно-термическую активацию процессов атомно-молекулярной перестройки (упрочнение и разупрочнение, рекристаллизация, растворение и выделение избыточных фаз, аллотропические превращения и т. д.) необходимо особо учитывать гетерогенность строения реальных тел. Циклическое нагревание контактных микрообъемов, обусловленное термоэлектрическими релаксационными процессами, усиливает неравномерность теплового движения атомов — энергетические флуктуации, что, согласно кинетической концепции прочности [310], приводит к ускоренному накоплению разрывов межатомных связей в областях структурных концентраторов напряжений, их группировке друг возле друга и локализации разрушения тел путем последовательного образования субмикро-, микро- и макроскопических трещин. Известно, кстати, что значительные внутренние напряжения в твердом растворе карбидов вольфрама в кобальте (этот раствор служит цементирующим материалом в термостойких режущих пластинах из сплавов группы ВК) возникают вследствие значительной разницы коэффициентов термического расширения карбида вольфрама и кобальтовой фазы.

Барроу и Спенсер [223] попытались выяснить, насколько существенно доля «термоэлектрического износа» в общем износе инструмента при стойкостных испытаниях на токарных станках с различным электрическим сопротивлением. Авторы пришли к выводу, что влияние термоэлектрических явлений на стойкость может быть значительным лишь при использовании станков с очень малым сопротивлением; что же касается подавляющего большинства случаев, то изоляция инструмента «не увеличивает достоверности стойкостных испытаний». Иначе говоря, если дополнительный износ, обусловленный протеканием термотоков, имеет место, то обычно он настолько незначителен, что не вызывает изменений периода стойкости, выходящих за пределы рассеивания экспериментальных данных совсем по другим причинам. Как полагают авторы, достоверность результатов стойкостных

<sup>1, 2</sup> Терминология Ф. П. Боудена.

<sup>3</sup> После возникновения металлических связей.

испытаний определяется таким доминирующим фактором, как динамическая характеристика системы *станок — инструмент — обрабатываемая деталь*.

Систематическое изучение того влияния, которое оказывает виброустойчивость данной системы на стойкость режущего инструмента, проводится Левиним и сотр., объяснившими повышение стойкости сверл с укороченным пластмассовым коническим хвостовиком именно его демпфирующим, виброгасящим действием [249], хотя в более поздних работах Левина [251] указывается на целесообразность применения изобретенной им<sup>1</sup> конструкции сверл не только с целью ослабления пагубного влияния на стойкость высокочастотных механических колебаний, но и для ограничения разрушительного действия термотоков, независимо от того, каков его механизм.

Влияние высокочастотных силовых импульсов, возникающих при резании, на упругонапряженные элементы режущего инструмента и устойчивость его геометрических параметров стало предметом специального исследования [319]. Было установлено, что формоустойчивость пластины из закаленной инструментальной стали и рабочей части, например, спиральных сверл определяется степенью воздействия «двух основных факторов: упругого напряжения и силовых импульсов высокой частоты, возникающих при резании»<sup>2</sup>. Изучая сверхтонкую структуру мессбауэровского спектра на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ , находящихся в ферромагнитном железе закаленной инструментальной стали<sup>3</sup>, авторы пришли к выводу, что «явление остаточной деформации упругонапряженных поликристаллических металлов под воздействием ангармонических силовых импульсов сопровождается интенсификацией направленного диффузионного переноса атомов углерода и других примесей, обусловленного изменением внутренней энергии деформируемого тела».

Григорьев [320], отрицая эффективность метода ГАО, считает наблюдавшееся им некоторое повышение стойкости инструмента при размыкании цепи термотока также проявлением демпфирующего действия специальной электронизолирующей оснастки, в частности установочного приспособления, склеенного эпоксидной композицией на основе смолы ЭД-6, или стальной втулки с капроновой прослойкой, получаемой путем заливки капрона под давлением в корпус переходного конуса через отверстие в хвостовике.

Если обратиться к изложенным выше представлениям, то по поводу затронутых здесь работ [223, 251, 319, 320], в той или

иной мере касающихся динамики контактных процессов, хотелось бы заметить следующее:

— механические колебания в зоне резания неотделимы от термоэлектрических релаксационных процессов, поэтому оба этих фактора всегда совместно влияют на разброс экспериментальных значений стойкости, от закона распределения которой зависит точность ее прогнозирования;

— влияние импульсного высокочастотного воздействия внешней силы на формоизменение режущего лезвия с упругонапряженными межатомными связями находит простое и ясное объяснение в свете представлений об определяющей роли термофлуктуационных актов атомно-молекулярных перестроек в развитии деформационных процессов и о направленности этих актов в поле механических напряжений [321]. Направленная диффузия атомов, обнаруженная Левиним и Никитиной методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии, являлась, по-видимому, лишь одной из таких перестроек второстепенного характера («сопровождающей», как ее правильно охарактеризовали авторы);

— условия динамического нагружения контактных площадок, в которых протекают термоэлектрические релаксационные процессы, являются уже сами по себе особенно благоприятными для схватывания [322];

— вполне вероятно, что как раз совокупное действие электроизолирующей оснастки, выступающей в роли демпфера механических колебаний, ослабляющей релаксационные процессы во внутренних термоэлектрических контурах и устраняющей такие процессы во внешней контуре, приводит к повышению стойкости инструмента.

Если по данным Бобровского [109] разрушительная функция термотока сказывается сильнее в том случае, когда меньше сопротивление станка, то Будзильский [294], придерживаясь диаметрально противоположной точки зрения на роль термотоков при резании, рекомендует производить станки с относительно малым  $R_0$ .

Как это вытекает из вышесказанного, важна не столько величина  $R_0$ , сколько ее стабильность; учитывая, однако, то обстоятельство, что колебания сопротивления станка суть фактически неизбежное явление, вряд ли можно согласиться с тем, что следует стремиться к увеличению термотоков во внешней контуре цепи.

В дополнение к сказанному отметим, что использование смазок является одним из эффективных способов успокоения высокочастотных колебаний (см. гл. II, § 4), а значит, ослабления механотермической активации фрикционных систем. Кроме того, СОЖ как бы уводят систему от энергетического порога схватывания за счет охлаждения контактных площадок и экранирующего действия смазочных пленок, предотвращающих сочленение решеток с близкой кристаллографической ориентировкой. Поэтому

<sup>1</sup> Совместно с И. В. Гоголевым.

<sup>2</sup> Пластины подвергались модельным испытаниям при соответствующих режимах статического и динамического нагружения.

<sup>3</sup> В качестве источника  $\gamma$ -излучения использовался  $^{57}\text{mCo}$ , диффундированный в Pd ( $W_\gamma = 14,4 \text{ кэВ}$ ).

му в условиях применения СОЖ эффект электрической изоляции инструмента либо заметно снижается, либо исчезает практически полностью.

Чем сильнее выражены релаксационные процессы при трении и резании, тем активнее выступают естественные термоэлектрические токи в качестве стимулятора образования между металлами адгезионно-когезионного шва. Информацию о характере релаксационных процессов дает спектр переменной составляющей интегральной э.д.с.  $\mathcal{E}_1(\mathcal{E}_1)$ <sup>1</sup>. Отсюда вытекает, что изучение таких спектров под углом зрения изложенных выше представлений может оказаться весьма плодотворным.

### § 3. Некоторые факторы, предопределяющие эффект электрической изоляции инструмента

Действие термотока на износостойчивость связано с особенностями протекания релаксационных, окислительных, диффузионных и других несомненно влияющих друг на друга процессов. Оно проявляется себя по-разному в зависимости от многих факторов или свойств, характеризующих фрикционную систему. В работе [29] была предпринята попытка показать, как с учетом некоторых из них можно заранее предвидеть, в каком случае размыкание внешнего контура термоэлектрической цепи *инструмент — деталь — станок* будет полезным мероприятием.

Мы стремимся к тому, чтобы при одних и тех же размерах проводящих контактных пятен протекающий через них термоток был минимальным. Значит, при прочих равных условиях должна быть наименьшей и термо-э. д. с., обуславливающая этот ток:  $\mathcal{E}_1 = \alpha \Delta T$ , где  $\alpha$  — удельная термо-э.д.с. данной пары,  $\Delta T$  — разность температур горячей и холодной зон естественного термоэлемента<sup>2</sup>.

Заметим, кстати, что подбором материалов с учетом их термоэлектрических свойств можно, по-видимому, добиться еще более значительного повышения стойкости режущего инструмента, нежели путем его изоляции. В самом деле, изолируя сперло, протяжку, резец и т. п., мы обесточиваем лишь внешний термоэлектрический контур *инструмент — деталь — станок*. Оптимальное же сочетание инструментального и обрабатываемого материалов ( $\alpha \rightarrow 0$ ) приводит к резкому ограничению термотоков как во внешней цепи, так и во внутренних термоэлектрических контурах непосредственно в зоне резания.

Величина  $\alpha$ , выраженная через абсолютные коэффициенты Зеебека, равна  $\alpha_{\text{инс}} - \alpha_{\text{обр}}$ , когда механизм проводимости инстру-

<sup>1</sup> См. гл. IV, § 3.

<sup>2</sup> Ниже для обозначения статических параметров, относящихся к анодной искусственной термопаре, мы воспользуемся индексом  $\mathcal{E}$ .

ментального и обрабатываемого материалов одинаков, но  $\alpha = \alpha_{\text{инс}} + \alpha_{\text{обр}}$ , если термопара *изделие — резец* представляет собой комбинацию электронного и дырочного проводников<sup>3</sup>. Отсюда следует, что при мало отличающихся друг от друга численных значениях  $\alpha_{\text{инс}}$  и  $\alpha_{\text{обр}}$  второй вариант является наиболее подходящим для проверки эффекта размыкания внешнего термоэлектрического контура.

О механизме проводимости сплавов можно судить по процентному содержанию и типу собственной проводимости легирующих элементов [232]<sup>4</sup>. Что касается значений абсолютных коэффициентов Зеебека, то их определение у обычных технических сплавов не имеет практического смысла. Объясняется это не только исключительной сложностью самой экспериментальной задачи<sup>5</sup>, но и чрезвычайно плохой воспроизводимостью результатов. Величина  $\alpha_{\text{ср}}^*$  (или  $\alpha_{\text{инс}}^*$ ) будет сильно изменяться в зависимости от того, из материала какой поставки данной марки, из какой поковки или прутка конкретно и даже из какой именно части заготовки сделан образец для испытаний.

Чтобы сопоставить термоэлектрические свойства сплавов, попробуем найти их удельную термо-э.д.с.  $\alpha^*$  в паре с некоторым стандартным (одинаковым во всех случаях) «термоэлектродом сравнения». При этом величина  $\alpha^*$ , называемая также относительным коэффициентом Зеебека, должна как бы автоматически учитывать и концентрацию, и знак носителей заряда в каждом из контактирующих проводников.

Режущим инструментом одной и той же марки обрабатываются многие металлы. Поэтому вполне логично изготавливать термоэлектрод сравнения из быстрорежущей инструментальной стали или твердого сплава.

На рис. 112 показаны графики изменения э.д.с.  $\mathcal{E}_1$  искусственного термоэлемента в зависимости от температуры  $t^*$  горячего спая, полученные для группы обрабатываемых материалов при их нагревании в паре со сталью Р18<sup>6</sup>. Температура холодного спая поддерживалась равной 18—20°C.

Из графиков видно, что величина  $\mathcal{E}_1$  растет примерно пропорционально температуре горячего спая в интервале от ~450 до ~750°C, причем это справедливо лишь для сплавов, обладающих проводимостью *n*-типа (табл. 13). В области температур до ~400°C функция  $\mathcal{E}_1(t^*)$  ведет себя довольно сложным образом, что может быть связано с преобладающим влиянием окис-

<sup>3</sup> Здесь и в дальнейшем имеется в виду преобладающий тип проводимости сплавов.

<sup>4</sup> См. табл. 4 на с. 69.

<sup>5</sup> Необходимо измерить теплоту Томсона в очень широких пределах температур [110].

<sup>6</sup> Применялись трубчатая электронагревательная платино-родиевая термопара и потенциометр типа Р300.



Таблица 13

Термоэлектрический ряд, составленный из группы сплавов по значениям коэффициента  $\epsilon_{P18}^*$

Марка сплава	ВНС-2	P18	ВНС-5	ЭИТО	ЭИМ4	ЭИТСА	ОТ4-1	СН-3	ХВН10Г	ВТ5
Преобладающий тип проводимости	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
$\epsilon_{300^\circ\text{C}}^*$ , мВ	-1,00	0	1,39	4,43	4,80	5,69	6,45	6,60	7,48	10,68
$\epsilon_{P18}^*$ , мВ/град	-1,25	0	1,75	5,55	6,00	7,10	8,05	8,25	9,35	13,35

ных полупроводниковых ингредиентов, сохранившихся на контактных площадках горячего спая. Характерным для всех кривых, независимо от типа проводимости сплава, является наличие резко выраженного максимума, и, что самое любопытное, восемь из девяти экстремальных точек приходится на температуру 800°C. Последнее обстоятельство, как нам кажется, обусловлено полиморфными превращениями, происходящими в стали P18. Именно эта сталь была неизменяющимся компонентом опытной термопары, а температура, равная 800°C, является для нее точкой аллотропического фазового перехода [254].

После изложенного становится ясным, что сопоставление термоэлектрических свойств обрабатываемых материалов по величине их удельной термо-э.д.с. в паре с инструментальным материалом оказывается невозможным из-за нелинейности функции  $\epsilon_i^*(t^*)$ , коэффициент  $\alpha^* = \alpha^*(t^*)$ .

Однако сплавы по их способности давать эффект Зеебека в соединении со сталью P18 удается расположить в своеобразный термоэлектрический ряд (см. табл. 13). Для этого в качестве критерия сравнения необходимо принять не величину  $\alpha^*$ , а значение  $\epsilon_{T_{sp}}^*$ , соответствующее температуре превращения  $T_{sp}$ , или, что еще удобнее, величину  $\alpha^* = \epsilon_{T_{sp}}^* / T_{sp}$ . Последнее соотношение дает возможность определить коэффициент  $\epsilon^*$  как удельную термо-э.д.с. искусственного элемента при температуре превращения. В рассмотренном здесь случае  $T_{sp}^* = 800^\circ\text{C}$ , откуда

$$\epsilon_{P18}^* = 1,25 \cdot 10^{-3} \epsilon_{300^\circ\text{C}}^* \text{ мВ/град.} \quad (5.7)$$

Из теплофизических свойств обрабатываемого материала особый интерес представляет его теплопроводность. По различным литературным источникам можно проследить, какое глубокое влияние оказывает она на характер теплообмена и общий тепловой баланс при резании металлов. Как наглядно показано в [323],

чем меньше коэффициент теплопроводности сплава, тем процесс пластического деформирования будет ближе к процессу адиабатному. От скорости распространения тепловой энергии в глубь тела обрабатываемой детали зависят средние температуры над-резцовых слоев стружки и подстружечных слоев реза, температура зоны резания в целом, а следовательно, и величины  $\Delta T$  и  $\epsilon_i$ .

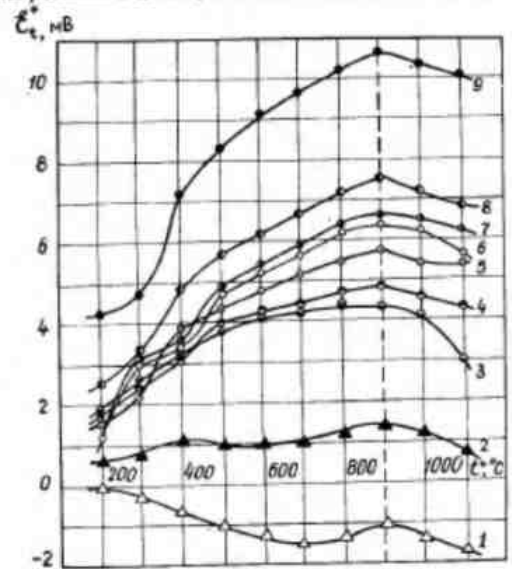


Рис. 112. Зависимость термо-э.д.с. искусственного элемента от температуры горячего спая при нагревании ряда материалов в комбинации с P18: 1—ВНС-2; 2—ВНС-5; 3—ЭИТО; 4—ЭИМ4; 5—ЭИТСА; 6—ОТ4-1; 7—СН-3; 8—ХВН10Г; 9—ВТ5

С участием термоточек в актах схватывания и диффузионного спекания материалов в какой-то мере ассоциируется зависимость их обрабатываемости от теплопроводности, которую мы и попытаемся вывести, сделав, как нетрудно убедиться в дальнейшем, вполне оправданное отступление.

В том, чтобы верно определить обрабатываемость материалов, состоит одна из основных задач оптимизации режимов резания. С точки зрения сокращения затрат материалов и времени весьма перспективными являются косвенные методы оценки обрабатываемости, когда она рассматривается как функция физико-механических, физико-химических и металлургических свойств метал-

ла. Наиболее полная совокупность таких свойств известна лишь для чистых металлов, поэтому именно для них на основании данных, содержащихся в справочных таблицах, оказалось возможным получить вполне удовлетворительную формулу показателя обрабатываемости [315]. Эта формула, однако, совершенно неприменима для определения обрабатываемости сталей и сплавов, на что, кстати, обращено внимание и в самой работе [315]. Для подобных материалов нельзя, к сожалению, указать многие из тех свойств, которые для чистых металлов могли быть определены заранее. Стали и сплавы одной и той же марки могут значительно отличаться по свойствам при переходе от поставки к поставке. Больше того, даже в пределах одной и той же заготовки свойства ее могут существенно измениться при переходе от слоя к слою. Различная предистория поставленных плавок и полуфабрикатов, а также неоднородность заготовок в пределах каждой из них приводят к неодинаковой обрабатываемости материала одной и той же марки, что особенно губительно отражается на нормальном ходе автоматизированного производства, вызывая простои оборудования.

Из сказанного, однако, не следует, что при оценке обрабатываемости сталей и сплавов косвенные методы неприемлемы. Сейчас уже многими исследователями установлены более или менее точные функциональные зависимости показателя (индекса) обрабатываемости от таких свойств материала, как твердость, действительный предел прочности, теплопроводность, поверхностное натяжение при температуре плавления и др. Эту же цель преследует и автор [324], прибегнув для вывода формулы показателя обрабатываемости к специально разработанному статистическому методу, изложенному в приложении П<sup>1</sup>.

В марочнике стали, выпущенном Научно-исследовательским институтом информации по машиностроению, приведены значения показателя обрабатываемости резанием  $K_v$  инструментом из стали P18 для 163 машиностроительных материалов; твердость  $HB$  или интервал ее изменения<sup>2</sup>, а также значения коэффициента теплопроводности сплавов при различных температурах ( $\lambda_{100}, \lambda_{200}, \dots, \lambda_{t^0}^0$ ) указаны для 154 и 65 материалов соответственно. На основании данных о стационарных температурных полях в зоне резания и максимальной температуре на контактных площадках [325—331, 213] с помощью ЭЦВМ для каждого сплава была рассчитана такая эквивалентная теплопроводность ( $\lambda$ ), что при условии ее независимости от температуры обрабатываемого материала последний

<sup>1</sup> Для ознакомления с методом читателю полезно будет заметить, что, используя условные обозначения величин, полученные широкое распространение в литературе, нет необходимости изменять их в зависимости от того, какова степень детерминированности случайной функции.

<sup>2</sup> В этом случае за истинную твердость принимается значение  $HB$ , приходящееся на середину интервала.

влияет на тепловод практически в той же мере, как и при изменении теплопроводности от слоя к слою.

Располагая указанными сведениями, найдем аналитическое выражение функции отклика

$$K_v(HB, \lambda).$$

Распределение материалов по обрабатываемости в пределах выбранных интервалов твердости представим в виде табл. 14.

Таблица 14

$K_v \backslash HB$	100—130	130—200	200—250	250—300	300—350
0—0,2	—	—	5	4	3
0,2—0,4	1	9	14	8	1
0,4—0,6	—	17	27	4	—
0,6—0,8	—	15	10	1	—
0,8—1,0	—	13	4	—	—
1,0—1,2	—	4	2	—	—
1,2—1,4	3	1	—	—	—
1,4—1,6	5	—	—	—	—
1,6—1,8	1	1	—	—	—
1,8—2,8	—	—	—	—	—
2,8—3,0	—	1	—	—	—

Из дальнейшего рассмотрения исключим три сплава (отмечены пунктирной клеткой), оказавшиеся за наиболее вероятными пределами распределения. Оценки для математических ожиданий величин  $HB$  и  $K_v$  находим по интервалам (табл. 15).

Таблица 15

$HB$	Число сплавов	$m_{HB}$	$m_{K_v}$	$HB$	Число сплавов	$m_{HB}$	$m_{K_v}$
100—150	9	128	1,505	250—300	17	270	0,364
125—175	30	158	0,970	275—325	8	291	0,268
135—185	32	167	0,790	300—350	4	323	0,175
157—187	37	171	0,790	150—250	121	203	0,620
150—200	59	181,5	0,708	175—275	110	216	0,565
175—225	73	201,5	0,620	200—300	79	233,5	0,560
200—250	62	223,5	0,533	225—325	45	253	0,425
225—275	37	245	0,460	250—350	21	280,5	0,330

Таблица 16

$\lambda, \frac{\text{мм}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$	11-19	19-27	27-35	35-43
$K_{v(fHB)}$				
0-0,2	4	—	—	—
0,2-0,4	9	5	1	—
0,4-0,6	—	8	7	3
0,6-0,8	—	—	3	4
0,8-1,0	1	1	—	—
1,0-1,2	—	1	—	—

Находим оценки математических ожиданий величин  $\lambda$  и  $K_{v(fHB)}$  (см. табл. 17).

Таблица 17

$\lambda, \frac{\text{мм}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$	11-19	19-27	27-35	35-43	11-27	19-35	27-43
Число сплавов	13	13	11	7	26	24	18
$\bar{m}_\lambda$	15,54	23,38	32,49	38,93	19,46	27,55	35,00
$\bar{m}_{K_v(fHB)}$	0,215	0,414	0,534	0,624	0,315	0,469	0,569

Полученную зависимость наилучшим образом изображает десятичная логарифмика (рис. 114), уравнение которой имеет вид  $\bar{m}_{K_v(fHB)} = \lg 0,1065 \lambda$ .

Но согласно предложенному методу мы можем допустить, что с достаточной для последующего анализа точностью

$$K_{v(fHB)} \approx \lg 0,1065 \lambda. \quad (5.12)$$

Тогда

$$K_v \frac{0,5}{3,735 (367,5 - HB) \cdot 10^{-2}} \approx \lg 0,1065 \lambda$$

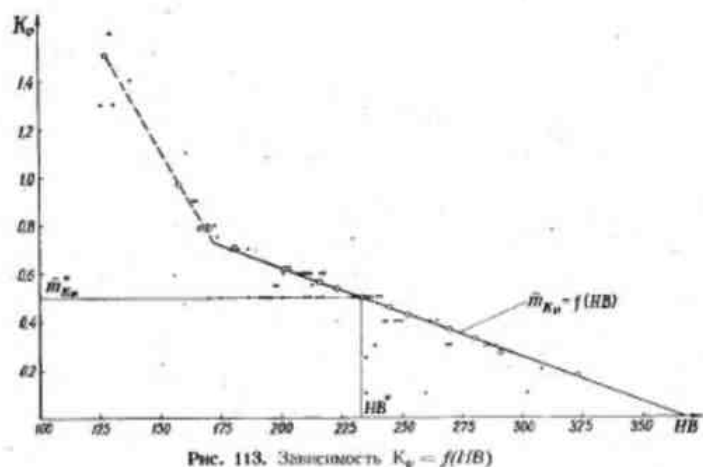
и окончательно запишем

$$K_v \approx 7,5 \cdot 10^{-3} (365 - HB) \lg 0,1065 \lambda. \quad (5.13)$$

Вычисленные по этой формуле значения показателя обрабатываемости были сопоставлены с экспериментальными значениями  $K_v$ , взятыми из марочника. Расчет охватывал только 24 сплава, для которых указано либо точное значение числа Бриелля,

Выясним характер полученной зависимости (рис. 113). При  $HB < 175$  нерегулярность в поведении точек выражена настолько сильно, что установить какую-либо общую закономерность весьма затруднительно. В области  $HB \geq 175$  расположение точек явно наводит на мысль о прямой зависимости, сглаживание которой по методу наименьших квадратов дает

$$\bar{m}_{K_v} = 3,735 (367,5 - HB) \cdot 10^{-2}. \quad (5.8)$$

Рис. 113. Зависимость  $K_v = f(HB)$ 

Приведение числовых значений показателя обрабатываемости к одному и тому же значению твердости ( $HB^* = 233$ ;  $\bar{m}_{K_v}^* = 0,5$ ) выполняем по формуле:

$$K_{v(HB)} = K_v \frac{0,5}{3,735 (367,5 - HB) \cdot 10^{-2}}. \quad (5.9)$$

Нетрудно видеть, что переход от функции  $K_v(HB, \lambda)$  к функции  $K_{v(HB)}(\lambda)$  завершен.

Как показало сравнение графиков, на которых все пары значений случайных величин изображались в виде точек,

$$D[K_{v(HB)}(\lambda)] < D[\lambda], \quad (5.10)$$

поэтому факторы  $\lambda$  и  $HB$  условимся считать независимыми.

Распределение оставшихся 47 материалов по  $K_{v(HB)}$  в пределах выбранных интервалов  $\lambda$  представлено в табл. 16.

либо  $HV$  со знаком  $\leq$ , или  $HV$  со знаком  $\geq$ , или интервал изменения твердости с шириной  $\Delta HV \leq 10^1$ . Полученные результаты (табл. 18) свидетельствуют о том, что отклонения расчетных данных от экспериментальных имеют тот же порядок, что и в случае специального исследования, выполненного на 15 сталях с целью изучения влияния действительного предела прочности и теплопроводности материалов на их обрабатываемость [332].

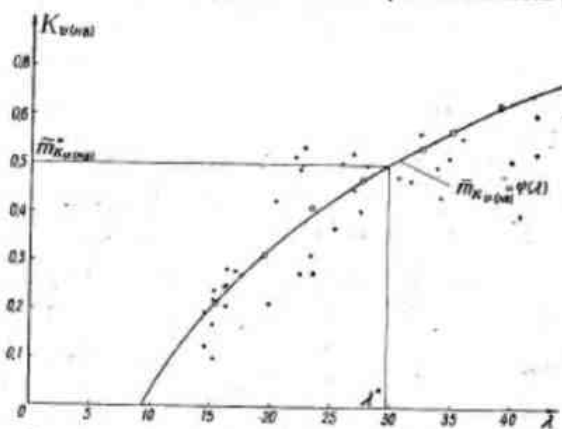


Рис. 114. Зависимость  $K_{v(HV)} = f(\lambda)$

Таблица 18

Число сплавов	Распределение сплавов по расхождению между расчетными и экспериментальными значениями индикатора обрабатываемости				
	0-10%	10-15%	15-25%	25-50%	50-100%
24	10	4	7	2	1
15	9	4	1	1	—

Если числовые значения  $K_{v(HV)}$  привести к одному и тому же значению коэффициента теплопроводности ( $\lambda^* = 29,7$ ;  $\bar{m}_{K_{v(HV)}}^* = 0,5$ ), то получим распределение 44 сплавов по  $K_{v(HV, \lambda)}$ , показанное на рис. 115.

Итак, мы располагаем данными для поиска третьего фактора, привлечение которого, наряду с  $HV$  и  $\lambda$ , помогло бы уточнить итоговую формулу и в конечном счете способствовало бы реше-

<sup>1</sup> Для остальных 20 материалов  $\Delta HV > 25$ .

нию проблемы оптимизации режимов резания в современной технологии механической обработки. Анализ неучтенного рассеивания точек (реализаций функции) наводит на мысль о том, что таким фактором может быть кристаллографическое соответствие атомно-электронных систем (инструментального и обрабатываемого материалов). Наиболее явно необходимость дальнейшей корректировки формулы показателя обрабатываемости выразилась в случае плохо проводящих тепло сплавов на никелевой основе, содержащих титан и алюминий<sup>1</sup>.

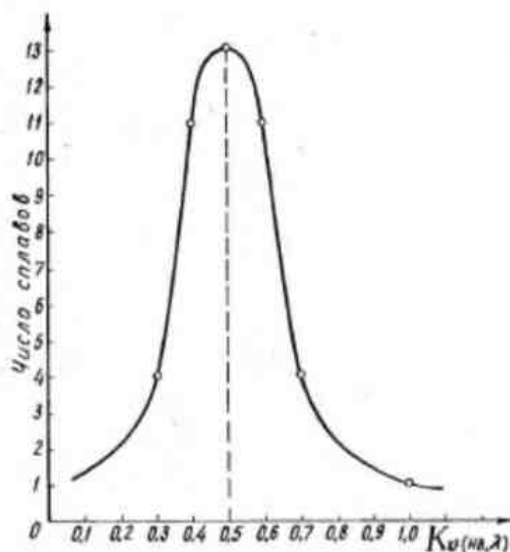


Рис. 115. Распределение сплавов по  $K_{v(HV, \lambda)}$  с модой, равной 0,5

Здесь уместно вспомнить различное поведение критерия эффективности метода ГАО с увеличением диаметра сверл при обработке титанового сплава BT5, сталей ЭИ654 и ВНС-5 (гл. IV, § 2). Не исключено, что именно низкая теплопроводность титанового сплава и его предрасположенность к схватыванию привели к возрастанию  $K_v(D)$ , несмотря на улучшение условий теплоотво-

<sup>1</sup> С точки зрения протекания при трении и резании термодинамических релаксационных процессов особый интерес вызывает свойство титано-никелевых сплавов сжиматься при нагревании и расширяться при охлаждении.

Таблица 19

Характеристики кристаллических структур металлических элементов, входящих в состав быстрорежущей стали Р18 и титанового сплава ВТ5<sup>2</sup> [254, 53]

Атомный номер	Элемент	Аллотропическая форма	Температура устойчивого состояния, °С	Тип кристаллической решетки	Координационное число	Постоянная решетки а, Å	Расстояние между ближайшими соседями d, Å	Содержание элемента в сплаве, %	
								Р18	ВТ5
13	Al	α	До 660	ГЦК	12	4,04	2,86	—	4,0—5,5 Основа
22	Ti		До 882 882—1660	ГЦК ОЦК	12 8	2,95 3,31	2,91 2,87	—	
23	V	α	До 1700	ОЦК	8	3,03	2,63	1,0—1,4 3,8—4,4	—
24	Cr		До 1830	ОЦК	8	2,88	2,49		
26	Fe	γ	До 910 1400—1535	ОЦК ОЦК	8	2,86	2,48	Основа	—
			910—1400	ГЦК	12	3,63	2,57		
74	W	β	До 3410	ОЦК	8	3,16	2,73	17,5—19,0	—

\* За исключением двух случаев, для которых температура указана в скобках, значения а и d приводятся для комнатной температуры, т. е. 18—25°С.

да из зоны резания через инструмент, и что именно по признаку влияния последнего фактора на эффект электрической изоляции сталь ЭИ654 оказалась полной противоположностью сплаву ВТ5, а сталь ВНС-5 заняла промежуточное положение между ними.

Известно, что металлы с ГП-решеткой обладают меньшей склонностью к схватыванию и имеют значительно меньшие коэффициенты трения, чем металлы с ОЦК- и ГЦК-решетками (см., например, [305]). Если термотоки способны вмешиваться в сами процессы атомной перестройки, ускоряя их начало, то полиморфные превращения, идущие в направлении реализации благоприятных для схватывания условий (ГП → ОЦК, ГЦК), должны помогать такому вмешательству и усиливать его внешнее проявление.

Итак, к факторам первостепенной важности, предопределяющим последствия размыкания внешнего термоэлектрического контура, следует отнести кристаллографическое соответствие атомно-электронных систем, их температурную аллотропию, термоэлектрические и теплофизические свойства.

#### § 4. Роль термоэлектрических явлений в образовании когезионного шва при обработке титановых сплавов

Из развитых выше соображений вытекает, что материалом, при обработке которого быстрорежущей сталью Р18 эффект электрической изоляции инструмента должен проявляться со всей очевидностью, является, по-видимому, титановый сплав марки ВТ5. Об этом говорят конкретно следующие моменты: а) сочетание Р18—ВТ5 представляет собой *p-n*-переход; б) наибольшее из полученных значений коэффициента  $e_{\text{рп}}^*$  относится к сплаву ВТ5; в) титановые сплавы, в том числе ВТ5, обладают низкой теплопроводностью; г) при обработке сплава ВТ5 температура на контактных площадках инструмента возрастает до 800°С и выше, о чем свидетельствует наличие максимума у кривых 3 и 4 на рис. 81; д) кристаллические структуры элементов, входящих в состав стали Р18, предрасположены к объединению с одной структурой β-титана, возникающей в сплаве ВТ5 при аллотропическом переходе (табл. 19)<sup>1</sup>; е) элементы, которыми легирована сталь Р18, растворяются в титане: V — неограниченно, W и Cr — с образованием интерметаллидов<sup>2</sup>. Все они изоморфны β-титану, а поэтому, диффундируя при резании в сплав ВТ5, могут ускорить появление в нем высокотемпературной аллотропической модификации; ж) электроперенос углерода в сплав ВТ5

<sup>1</sup> Будучи α-стабилизатором, алюминий несколько повышает температуру дикорфного α → α + β превращения титана в сплаве ВТ5.

<sup>2</sup> О способности карбидов вольфрама растворяться в карбидах титана см. в книге [333].

снижает пластичность прирезового слоя, способствуя в то же время потере инструментом его твердости.

Микрофотографии, иллюстрирующие эффект электрической изоляции сверл в применении к рассматриваемому сочетанию инструментального и обрабатываемого материалов (Р18—ВТ5), представлены на рис. 116. В случае замкнутого внешнего контура явления адгезии и спекания выражены несравненно сильнее, а посадка инструмента происходит намного быстрее, чем при работе с изолирующим приспособлением.

Не менее наглядным подтверждением разрушительной функции термотока в подобных условиях являются микрофотографии, приведенные на рис. 117. Когда внешний термоэлектрический контур замкнут, то при выбранных режимах обработки удается просверлить лишь одно-два отверстия, после чего сверло прочно спаривается с титаном и ломается (рис. 117, б). У аналогичного сверла, но изолированного в электрическом отношении, тенденция к схватыванию и спеканию с титаном после выполнения им того же количества отверстий практически себя не обнаруживает (рис. 117, в). Инструмент продолжает работать, и только при выполнении седьмого-восьмого отверстия происходит его сваривание с деталью и стружкой (рис. 117, г).

Остановимся на изменениях в структуре быстрорежущей стали. При резании сплава ВТ5 наблюдается уменьшение числа

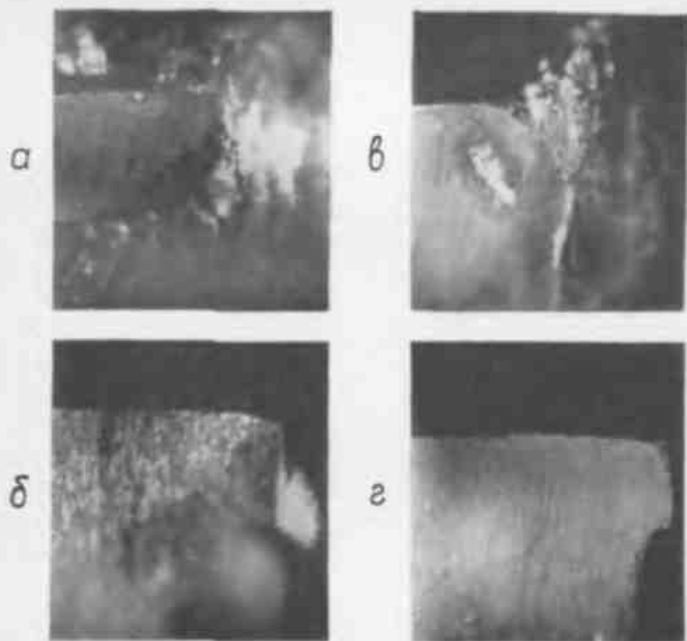


Рис. 116. Налипание стружки на инструмент (слева) и износ сверл по задней поверхности (справа) при различных состояниях термоэлектрической цепи инструмент — деталь — станок ( $\times 20$ ):

а, в, — внешний контур заготовки (после 7 отверстий); б, г, — разомкнут (после 7- и 20-к отверстий соответственно). Толщина заготовки 25 мм; диаметр сверл 10 мм; режимы резания: в—6 мм/мин; г—6,10 мм/об

и размеров специальных карбидов, разбросанных «по полю» мелкокольчатого мартенсита (ср. рис. 117, а и б). Если это уменьшение связано с диффузионными процессами, то перенос диффузанта должен ослабевать, когда он обусловлен лишь градиентом температуры, а силовое электрическое поле отсутствует (ср. рис. 117, б и в). Дрейф ионов в сторону титанового сплава может сопровождаться ростом гранул, размеры которых особенно велики в самом пограничном слое стали Р18 (рис. 117, г). Весьма вероятно, что речь здесь идет об обычной коагуляции специальных карбидов. Однако отсутствие такой коагуляции при работе с замкнутым контуром позволяет рассмотреть данный процесс с совершенно иных позиций. Предположим, например, что силь-

ный эффект электронно-дырочного уudeчения обеспечивает не только перенос мигрирующих ионов через поверхность раздела фаз, но и дальнейшую их транспортировку в глубину обрабатываемого сплава. Само собой разумеется, что подобная транспортировка невозможна, если внешний термоэлектрический контур разомкнут. В этом случае происходит как бы насыщение диффузанта пограничного слоя титана, что приводит к торможению ионов и таким образом затрудняет термодиффузию легирующих элементов из стали Р18.

Полученный экспериментальный материал подтверждает справедливость гипотезы, согласно которой термоток выступает как стимулятор схватывания и диффузионного спекания металлов.

Более чем трехкратное увеличение стойкости быстрорежущих сверл, изолированных от станка с помощью специальной оснастки, наблюдалось не только при обработке титановых сплавов (ВТЗ, ВТ5, ОТ4-1 и др.), но и нержавеющей сталей, содержащих титан. Выяснилось, однако, что хотя сверление титановых сплавов и рассматривается как одна из наиболее вероятных областей, где мы ждем проявления эффекта, последний оказался неустойчивым даже в этом конкретном случае, казалось бы столь подходящем для его практического использования [334]. Разрушительное действие термотока, протекающего по цепи инструмент — деталь — станок, сказывается лишь при определенных условиях обработки и зависит от совокупности рассмотренных выше факторов, которые сами по себе могут оказывать на процесс резания еще более глубокое, а порой и доминирующее влияние. Разовые опыты показали, например, что в отличие от приведенных ранее результатов (гл. IV, §2) использование склеенного патрона при сверлении стали 0Х18Н10Т дает выигрыш в стойкости быстрорежущего инструмента только при некоторых промежуточных режимах обработки, когда ослабление когезии стружки к сверлу после его электроизоляции оказывается особенно значительным. Переход на относительно малые или большие скорости резания влечет за собой либо значительное ослабление эффекта, либо фактически полное его отсутствие. Кроме того, применение склеенного патрона может давать выигрыш в стойкости лишь отдельных, но всегда одних и тех же сверл в пределах опытной партии (рис. 118). Можно поэтому думать, что те определенные условия, о которых говорилось выше, действительно связаны с динамикой контактных явлений и создаются во время преодоления системой энергетического порога схватывания, когда колебания термоэлектрических токов превращаются в своеобразный катализатор процессов, протекающих в контактной зоне на атомном уровне (сочленение кристаллических решеток, перекристаллизация и др.).

Общий итог такого рода соображений и вывод о прямой зависимости эффекта электрической изоляции от структурного состояния инструментального и обрабатываемого материалов стали

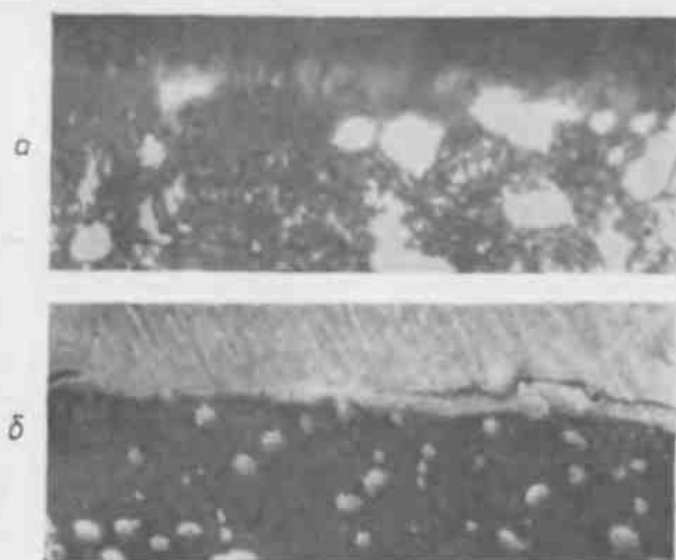


Рис. 117. Микрофотографии сверла в осечки,

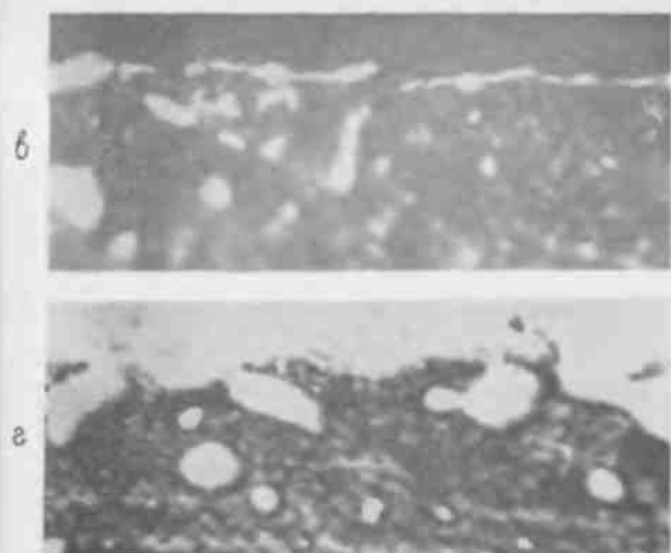
а — после сверления после заточки; б — после выключения двух отверстий при работе с алмаз

Таблица 20

Критерий эффективности  $K_2$  при сверлении термообработанных титановых сплавов с применением СОЖ\*

Марка сплава	Термическая обработка				
	состояние поставки	нагрев до 800°C и охлаждение на воздухе	закалка с 1100°C на воздухе	нагрев до 800°C и охлаждение в масле	закалка с 1100°C в воде
OT4	~1	<1	>1	~1	~1
BT3	~1	<1	>1	~1	~2
BT6	~1	~1	>1	>1	>1
ЗВ	~1	>1 (~2)	~1 (~4)	(~2) <1	(~2) ~1

\* В скобках приведены значения  $K_2$ , наблюдаемые по результатам отдельных попыток данной серии. Условия обработки резанием:  $v=62,5$  м/мин;  $s=0,17$  мм/об;  $D=10,5$  мм; глубина сверления  $h=20$  мм; 5%-ный рр эмульсия в воде; смазочный насос; редукционно сверлильный станок ДАД.



перпендикулярном режущему лезвию (X1500):

а — после сверления; б — с разуплотненной структурой; з — после выключения сверла отверстия. Режимы резания:  $v=10,5$  м/мин;  $s=0,17$  мм/об.

основными предпосылками для проведения контрольного эксперимента, состоящего в сравнении величин  $K_2$  при сверлении титановых сплавов с равновесной и закалочными микроструктурами. С сожалением приходится констатировать, что при выбранных режимах резания использование специальной оснастки при работе сверл с охлаждающей эмульсией оказалось мало эффективным (табл. 20). В том случае, однако, когда смазочно-охлаждающая жидкость не препятствовала встрече ювенильных поверхностей, а механические колебания в системе усиливались, эффект электрической изоляции инструмента иногда сразу же становился ощутимым.

Наглядным подтверждением влияния микроструктуры обрабатываемого материала на эффект размыкания внешнего контура явились опыты по сверлению титанового сплава ЗВ без применения СОЖ. В состоянии поставки исследуемые образцы имели структуру  $\alpha$ -фазы, сформированной из грубых выдманистетовых пластин (рис. 119, а). После закалки с 1100°C эти же образцы приобрели термодинамически неустойчивую структуру  $\alpha'$ -фазы, тонкопластинчатой при охлаждении на воздухе (рис.



Рис. 118. Когезия быстрорежущей стали Р18 и титановому сплаву ОТ4 при различных состояниях цепи термотока (— замыкнута, --- разомкнута) и режимах резания:  
1, 2, 3— $v=8$  м/мин,  $s=0,12$  мм/об, 4, 5— $v=10,5$  м/мин,  $s=0,20$  мм/об (диаметр сверл 11 мм; обработка стружкой).

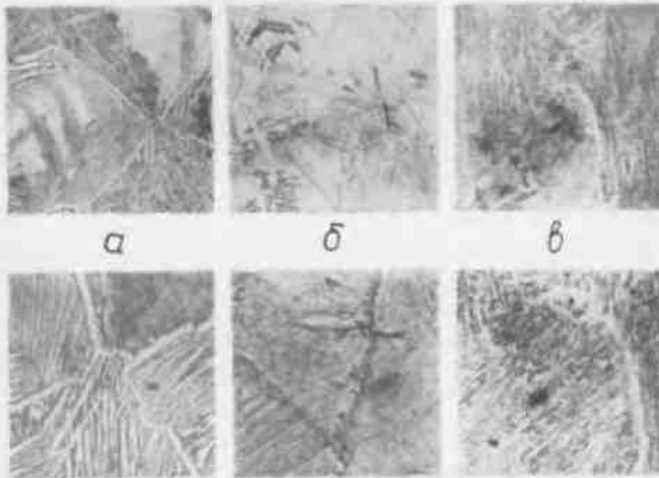


Рис. 119. Микроструктура титанового сплава 3В в состоянии поставки (а), после закалки с 1100°С на воздухе (б) и в воде (в).  $\times 70$  (верхний ряд) и  $\times 450$  (нижний ряд)

119, б) и тонкогильчатой при охлаждении в воде (рис. 119, в). Твердость образцов сравнивалась по диаметру отпечатка сферического индентора; она оказалась наибольшей у образцов, закаленных в воде ( $d=3,80$  мм), несколько меньшей у образцов, закаленных на воздухе ( $d=3,90$  мм), и наименьшей у материала

в состоянии поставки ( $d=4,05$  мм). Соответственно этому изменение обрабатываемости сплава 3В сверлами, закороченными со станком (цепь термотока замкнута), выразилось примерным соотношением 1:2:4. Что касается среднего числа отверстий, просверленных между переточками без закорачивающего шунта (цепь термотока разомкнута), то по сравнению с числом отверстий, сделанных при включенном шунте, оно практически не изменилось при обработке незакаленного сплава, однако возросло примерно вдвое при резании после закалки. Попробуем объяснить полученный результат, основываясь на идее о непосредственном вмешательстве термотоков в акты взаимодействия твердых тел, приводящие к их свариванию.

С повышением температуры в зоне резания в контактных микрообъемах, прилегающих к поверхности раздела инструмент—деталь, происходят фазовые превращения. Сначала эти превращения охватывают быстрорежущую сталь: мартенситная ОЦК-решетка переходит в аустенитную решетку ЦЦК; затем начинается аллотропический  $\alpha \rightarrow \beta$  переход в титановом сплаве. Как только появятся локальные очаги схватывания, то есть возникнут металлические связи, играющие роль туннелей для мигрирующих ионов, происходит вспрыск диффузанта в самый пограничный слой титанового сплава. Поскольку некоторые из элементов, которыми легирована быстрорежущая сталь, являются для титана  $\beta$ -стабилизаторами, особенно ванадий, то они инициируют рост областей  $\beta$ -фазы, создавая тем самым благоприятные условия для сваривания металлов. Так как энергетические флуктуации ионов и сама плотность диффузионного потока зависят от наличия его электродиффузионной составляющей, следует полагать естественным, что состояние внешнего контура (замкнут или разомкнут) может отразиться на стойкости инструмента и шероховатости обработанной поверхности.

То, что изложено выше, не позволяет считать обоснованными рекомендации Бобровского [109] по универсальному практическому использованию метода ГАО и еще раз говорит о необходимости дальнейшего изучения проблем в области электрофизики резания.



## Глава VI

### ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ МЕТАЛЛ — ПОЛИМЕР

#### § 1. Введение

В настоящей главе не преследуется цель хотя бы кратко охарактеризовать весь комплекс явлений, объединенных понятием «статическая электризация». Учение о статическом электричестве представляет собой столь обширный и автономный раздел физики, что такая характеристика в рамках данной монографии представляется совершенно ненужной ввиду наличия специальной литературы [335, 336 и др.]. Излагаемый материал носит по преимуществу информационный характер и служит иллюстрацией той роли, которую играют электрические явления при работе трениевых систем, состоящих из металла и диэлектрика.

В таких системах, в отличие от пары металл—металл, нейтрализация зарядов при разделении обкладок трениевого микроконденсатора может происходить по механизму самостоятельного газового разряда с развитием в газовом зазоре лавинного процесса. Такие лавинные разряды, вызывающие разрушение двойных электрических слоев при отрыве пленок диэлектрика, были зарегистрированы Дерягиным и Кротовой (рис. 120)<sup>1</sup>, что в свое время и послужило экспериментальным подтверждением электрической природы адгезионных сил (электрической теории прилипания пленок к твердым телам) [34].

Если возможна электрическая эрозия трущихся поверхностей в искровых микроскопических разрядах, то ей, по-видимому, свойственны в какой-то мере те же черты, что и искусственному разрушению материалов в импульсных электрических разрядах, имеющему электротермическую природу [337, 338] и ши-

роко не используемому в промышленности. Обобщая сведения об искровой форме электрического разряда, Лазаренко [181] пишет, в частности:

— «такая форма электрического разряда возникает только при очень высоких значениях напряженности электрического поля»;

— «искровой электрический разряд является нестационарным физическим процессом длительностью  $10^{-3}$  с и меньше»;

— «амплитудные значения тока и мощности, которые могут быть достигнуты при искровом электрическом разряде, невозможно получить никакими другими способами»;

— «температура искрового канала близка к температуре солнца и не может быть получена никакими другими управляемыми процессами»;

— «расщепляющее действие импульса столь велико, что все химические элементы, входящие не только в состав межэлектродной среды, но и в состав электродов, дают атомарный спектр и т. п.

Как видим, электросрозионная разновидность износа при трении, пусть она лишь в миниатюре напоминает электрическую эрозию металлов при наличии постороннего источника, может оказаться весьма опасной.

Существуют различные способы снижения электризации трением: повышение относительной влажности, применение нейтрализаторов статического электричества с радиоактивными изотопами, увеличение электропроводности полимерных материалов за счет ввода в них специальных наполнителей и т. д. Одной из последних рекомендаций, направленных на ослабление электризации и износа химических штей при трении о направляющие текстильного оборудования, является предложение делать эти направляющие из пористых спеченных материалов, пропитанных антистатическими препаратами на основе минеральных масел с добавками поверхностно-активных веществ [339].

В то же время вместо борьбы с электризацией трением к ней все чаще начинают обращаться как к положительному явлению с целью, например, обеспечения благоприятных условий для знакопеременного переноса, как особой разновидности избирательного переноса, в металлополимерных узлах трения [340]. На использовании явления электризации трением фактически основано создание нового класса устройств для автоматической загрузки миниатюрных деталей, в частности кристаллов дискретных полупроводниковых приборов, интегральных схем и изделий оптоэлектроники [341]. Исследование адгезии таких пластичных легкоповреждаемых деталей к наэлектризованным трением о металлическое контртело диэлектрикам было выполнено автором и сотр. [342] с помощью маятникового адгезиометра, построенного по принципу адгезиометра Дерягина [34]. Согласно статистическим оценкам меры адгезии — средней энер-



Рис. 120. Разряд при отрыве пленки нитроцеллюлозы от желатина [34]

<sup>1</sup> Стыжок Н. Н. Захваленой.

гни отрыва  $\bar{W}$ , способность удерживать миниатюрные детали за счет сил электростатического притяжения выражена у диэлектриков, назлектризованных в одинаковых условиях, самым различным образом. Что касается количественных оценок меры адгезии на сугубо теоретической основе, то дать их пока оказалось невозможным по соображениям, изложенным в следующем параграфе.

## § 2. Современные представления о механизме электризации трением

Известно, что истинная трибоэлектризация имеет место лишь при несимметричном трении химически одинаковых материалов [336]. Она может быть связана с разной скоростью распространения заряда через поверхность раздела трущихся тел вследствие различия их температурных градиентов [129]. В большинстве же случаев электризация тел при трении обусловлена так называемой контактной электризацией, а сам процесс трения приводит лишь к увеличению числа контактирующих областей. Вместе с тем необходимо учитывать, что эффекты, свойственные процессу трения, могут оказать существенное влияние на характер перехода электронов или ионов через поверхность раздела фаз и даже изменить механизм контактной электризации. В дальнейшем, однако, термину «трибоэлектризация» приписывается более общее значение — он относится и к случаю контактирования поверхностей двух разнородных материалов.

Лишь по отношению к контакту двух металлов, двух полупроводников, металла и полупроводника можно говорить о более или менее четком понимании механизма перераспределения зарядов. Контактная электризация в этом случае обусловлена преобладающим переходом электронов через границу раздела от вещества с меньшей работой выхода к веществу с большей работой выхода. Что же касается диэлектриков, то обзор специальной литературы указывает на некоторую неопределенность и даже противоречивость точек зрения на механизм их контактной электризации. К сожалению, уже стало традицией повторять, что единое представление о механизме трибоэлектризации диэлектриков до сих пор отсутствует. Считается, например, что при контакте металла и диэлектрика электризация обусловлена переходом электронов из металла в диэлектрик и переходом положительных или отрицательных ионов на поверхность металла; при контакте двух диэлектриков электризация возникает вследствие диффузии носителей заряда из одного вещества в другое. Физико-химическая «грязь» в этом случае рассматривается как побочный фактор, который может исказить явление электризации, но не изменить его природу.

На возможность другого подхода к вопросу образования статических зарядов указывается в [343]. Отмечается также, что

перенос ионов играет важную роль при электризации твердых тел, однако предпочтение отдается тем из мобильных ионов, которые образовались вследствие электролитической диссоциации в поверхностных пленках влаги. Полагают, что разрыв двойного диффузионного слоя электролитических ионов, находящихся в тончайших пленках воды между двумя диэлектриками (металлом и диэлектриком), является причиной электризации отделяемых друг от друга поверхностей. Иными словами, сам диэлектрик не может приобрести значительный заряд при актах фрикционного взаимодействия; он способен назлектризоваться лишь тогда, когда «испачкан» электролитической грязью.

Согласно Харперу [343], диэлектрики делятся на два класса. К первому относятся так называемые электрофильные диэлектрики (гидрофильные материалы), которые в результате соприкосновения с металлом заряжаются весьма сильно (стекло, плавленый кварц, окись магния). Вторым классом составляют электрофобные диэлектрики (гидрофобные синтетические полимеры), заряд которых при аналогичных условиях не регистрировался даже чувствительной аппаратурой. К этому классу относятся: полиэтилен, янтарь, полистирол, нейлон, кремний, полиметилметакрилат, политетрафторэтилен и другие материалы. С точки зрения способности электризоваться двум указанным классам диэлектриков соответствуют подобные им два типа грязи — электролитическая и жировая. Отмечается, что по мере удаления жировой (электрофобной) грязи с поверхности электрофильного диэлектрика его заряд возрастает. Напротив, удаление электролитической (электрофильной) грязи с поверхности электрофобного диэлектрика приводит к уменьшению его заряда вплоть до нейтрального состояния. В реальных случаях, когда грязь имеет сложный состав, т. е. включает в себя и жировую и электролитическую компоненты, влияние очистки диэлектрика на степень его электризации будет выражено не так сильно. Харпер подчеркивает, что электрофильность (электрофобность) является внутренним, неотъемлемым свойством диэлектрика, связанным с проявлением его гидрофильной (гидрофобной) природы.

Оригинальное решение вопроса о механизме трибоэлектризации диэлектриков предложено недавно Корифельдом [344]. В основу этого решения положена гипотеза о существовании у твердых диэлектриков (ионных кристаллов, аморфных и полимерных тел) собственного электрического заряда<sup>1</sup>. Помимо исследований самого Корифельда<sup>2</sup>, наличие такого заряда подтверждается результатами других экспериментальных работ. В [347], например, показана способность назлектризованных образцов (турмалин, карборунд, кварц) сохранять свои заряды

<sup>1</sup> В местах скопления одноименных вакансий.

<sup>2</sup> См. также [345, 346].

при нагревании в высоком вакууме до температур, гарантирующих отсутствие влаги.

По Корифельду, компенсация собственного заряда диэлектрика происходит за счет селективной адсорбции ионов противоположного знака. Поэтому физико-химическая грязь на поверхности диэлектрика сама заряжена. При трении двух образцов слои грязи перемешиваются и перераспределяются между трущихся поверхностями. Компенсация собственных зарядов нарушается, что и является причиной трибоэлектризации.

В свете изложенного становится ясным, почему проявление адгезионных сил, имеющих трибоэлектрическую природу, оказывается столь сложным и многообразным. Функциональные зависимости этих сил изучаются обычно в условиях, позволяющих добиться воспроизводимости результатов измерений. Влияние поверхностной плотности заряда, например, может быть учтено в том случае, когда трущаяся пара диэлектрик — чистый металл находится в контролируемой атмосфере [348]. В естественных же условиях поверхность диэлектрика, используемого, скажем, в качестве материала рабочего тела (транспортера) трибоэлектрического загрузочного устройства, находится в средах с различным ионным составом, а для изготовления контрола применяются, в частности, стали и сплавы. Поэтому предсказать заранее, к какому из диэлектриков миниатюрные детали будут прилипать наилучшим образом, удается далеко не всегда.

Поскольку настоящая глава посвящена, согласно ее названию, трущимся парам металл — полимер, нельзя не подчеркнуть, что, говоря об адгезии миниатюрных деталей, автор, естественно, имеет в виду не только и даже не столько металлические детали, например из припоя, сколько основные элементы изделий электронной техники, т. е. полупроводниковые кристаллы.

Неравноценность диэлектриков с точки зрения их применимости для изготовления транспортеров проиллюстрирована в работе [342] на примере исследования аттракционного взаимодействия с подложкой монокристаллов германия. Результаты этого исследования, согласующиеся с некоторыми изложенными выше представлениями, отражает табл. 21.

Таблица 21

Адгезия пластин из монокристаллического германия к различным диэлектрикам, наэлектризованным трением о сталь (С) и латунь (Л)

Диэлектрик (образец)	Орестекло		Винилпласт		Фторопласт-4		Полипропилен		Полистирол	
	С	Л	С	Л	С	Л	С	Л	С	Л
Контроль										
Мера адгезии $\bar{W}$ , эрг	0,32	0,56	0,41	0,44	0,26	0,27	0,19	—	0,14	—

Как видим, адгезия пластин к любому из материалов, наэлектризованных в паре с латунью, оказалась значительней адгезии при электризации трением о сталь.

По способности удерживать пластины из германия диэлектрики располагаются в следующий ряд:

орестекло  
винилпласт  
фторопласт-4  
полипропилен  
полистирол.

Самое низкое значение  $\bar{W}$  у полистирола, поэтому не случайно его относят к типичным электрофобным диэлектрикам. Заряд при трибоэлектризации полистирола, по Харперу, на четыре порядка ниже, чем заряд на поверхности электрофильного диэлектрика — кристаллического кварца. Отметим, однако, что тот же Харпер, в опытах которого полистирол заряжался очень плохо, подчеркивает возможность сильной электризации пленок полистирола в производственных условиях (при изготовлении конденсаторов). С таким неостоянством «трибоэлектрической восприимчивости» одного и того же материала пришлось столкнуться и авторам работы [342]. Измерения на квадрантном электрометре показали, что в случае, например, винилпластового образца статические заряды его противоположных сторон, наэлектризованных одинаковым образом, могут резко отличаться по величине. Различная окраска сторон, свидетельствующая об их различной поверхностной структуре, была заметна невооруженным глазом. Этот факт наводит на мысль о том, что при определенных условиях технологической обработки поверхности твердого тела оно может переходить из класса электрофобных диэлектриков в класс электрофильных, и наоборот. Все зависит от того, приводят ли данные условия к появлению структурных дефектов, благодаря которым, по Корифельду, поверхность диэлектрика имеет собственный электрический заряд.

Несмотря на то что многие экспериментальные факты говорят в пользу гипотезы, выдвинутой Корифельдом [344—346], вряд ли можно ожидать, что удастся, по крайней мере в недалеком будущем, обосновать какой-либо единый механизм статической электризации. Рассматривая явление электризации с наиболее общих позиций — образования и разрушения двойного электрического слоя, как это делает, в частности, Бенинг [349], мы должны учитывать не только огромное разнообразие веществ (неорганических и органических, диэлектриков, полупроводников и твердых проводников), вовлекаемых в круг исследований по статической электризации, но еще большее разнообразие условий, в которых это сложное явление проявляется. Именно отсюда становится понятной разноречивость многочисленных работ по изучению контактного электричества, на фоне которой приобретают особую ценность закономерности трибо-

электричества, явившиеся обобщением лабораторного и производственного опыта (табл. 22).

Таблица 22

Некоторые закономерности трибоэлектричества

Фрикционные пары	Знак заряда	
	+	-
Два химически одинаковых тела	более плотное тело	менее плотное тело
Диэлектрик—мелькие частицы (пыль) из этого же диэлектрика	диэлектрик	мелькие частицы
Диэлектрик—диэлектрик	диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью	диэлектрик с меньшей диэлектрической проницаемостью
	диэлектрик с большей твердостью	диэлектрик с меньшей твердостью
Металл—металл	металл с меньшей твердостью	металл с большей твердостью
Металл—диэлектрик	диэлектрик	металл

*Ряд Фарадея:*  
(+) мех. флигель, слоновая кость, перья, горный хрусталь, флинтгалс, бумажная ткань, шелк, дерево, металлы, сера (-)

*Ряд Гельмгольца:*  
(+) алмаз (твердость 10), топаз (8), горный хрусталь (7), гладкое стекло (5), сажа (3), вальцет (3), сера (2), воск (<1) (-)

Итак, мы смогли лишний раз убедиться в том, что каждый конкретный случай трибоэлектризации имеет свою специфику, причем сам процесс трения и изменение внешних условий оказывают на нее глубокое влияние.

### § 3. Влияние электризации на явления переноса в металлополимерных парах трения

Параллельное изучение механохимических и трибоэлектрических явлений при скольжении пластмасс по металлу облегчает понимание природы образования пластмассовых пленок на поверхности металла и, наоборот, переноса металла на поверхность

пластмассы. Механохимические эффекты сводятся к разрыву углерод-углеродных и других химических связей в тех местах полимерных цепей, где энергия связи достаточно велика, кренингу цепочечных макромолекул с появлением аномально высокой концентрации свободных радикалов и вступлению этих радикалов в различные химические реакции [350—352], в том числе в прямые реакции «с окисленной и ювенильной поверхностью металла на участках ее обнажения при трении и износе по схеме» [32]:



или через образование промежуточного перекисного радикала  $R - CH_2 - O - O -$  в результате присоединения кислорода [353].

Принято считать, что нарушения ковалентных связей в молекулах обеспечиваются подводимой извне механической энергией без какого-либо участия термомеханических эффектов. Автор не разделяет этой точки зрения и, следуя кинетической концепции прочности [310], придает большое значение термофлуктуационным актам начального распада перенапряженных молекул полимера, вызывающих появление в его прослойках первых свободных радикалов. Такие акты играют роль как бы «спускового механизма» и приводят к быстрому распаду множества других полимерных молекул, что «высвобождает большое количество сосредоточенной в них упругой механической энергии» [310]. Выделение последней (в виде тепла) способствует, на наш взгляд, полимеризации осколков макромолекул, которая может пойти по пути образования вторичных структур, заметно отличающихся по своим физическим свойствам.

Установившемуся режиму трения в системе металл—полимер соответствует, по-видимому, некоторое динамическое равновесие скоростей распада и образования полимеров (сополимеров), на которое степень электризации и ее знак оказывают самое непосредственное влияние. Действительно, скольжение пластмасс по металлу сопровождается существенным нарушением электронной плотности в каждой точке фрикционного контакта. Переход зарядов через границу раздела может происходить как в том, так и в другом направлении; в зависимости от этого пластмасса заряжается либо положительно, либо отрицательно по отношению к сопряженному с ней металлическому телу. Поэтому и принято условно делить пластмассы на электроположительные и электроотрицательные. Подкачка, например, электронов к поверхности раздела со стороны органического соединения в принципе возможна благодаря перемещению электронов вдоль цепи макромолекул по линии ковалентных связей и переходам между соседними длинноцепочечными молекулами [4]. Что касается подпитки свободными электронами приповерхностного слоя металла, то она зависит от электроемкости металли-

ческого образца и может происходить бесконечно долго, если последний соединен с таким практически «бездонным» резервуаром электрических зарядов, как, скажем, Земля. Приобретение поверхностью диэлектрика потенциала в несколько тысяч вольт свидетельствует о существовании между обкладками фрикционного конденсатора очень сильного электрического поля, активизирующего эрозийные и диффузионные процессы и, что самое главное, вызывающего вырывание и перенос ионов металла на электроотрицательную пластмассу или, наоборот, перенос электроположительных продуктов термомеханодеструкции полимера на металлическую поверхность с образованием на ней защитной пленки. Прочность этой пленки зависит от реакционной способности атомов углерода с ненасыщенными валентными связями и в какой-то мере, если учесть обратное восстановление гомогенных цепей и появление новых гетерогенных молекул, — от адгезионной активности функциональных групп полимерных материалов. Кинетика механохимических и трибоэлектрических явлений отражается на поведении коэффициента трения, определяющего порядок сил, противодействующих скольжению и прилагаемых к металлополимерной фрикционной системе.

Некоторым основанием изложенных выше представлений послужила небольшая серия работ, главными моментами которых являются следующие:

— намазывание антифрикционных пластмасс на металл происходит в случае приобретения ими положительного электрического заряда; если в паре с металлом находится отрицательный полимер, то наблюдается металлизация его поверхности [354];

— весовой износ металла и фрикционных пластмасс оказывается наименьшим, если в состав последних вводятся пленкообразующие вещества, обладающие по отношению к металлу высокой адгезионной способностью [355];

— процесс фрикционного взаимодействия вызывает существенное изменение состояния и свойств (электропроводности, теплопроводности) приповерхностного слоя полимера, находящегося в контакте с металлом [356, 356]. После резкого снижения электросопротивления такого слоя (на 4—10 порядков) наступает относительно стабильный режим трения [357], что, по видимому, связано с ростом числа носителей заряда в единице объема до появления устойчивой электрической модификации поверхности, от удельного сопротивления которой зависит и степень ее электризации;

— удобным методом исследования кинетики электризации и ее влияния на развитие процессов переноса в парах трения металл — полимер является снятие кривых тока электризации (или скорости накопления зарядов) [355, 357];

— миграция продуктов механодеструкции полимеров происходит под действием пондеромоторных сил электрических полей

микроконденсаторов, возникающих в зоне трения. Замена металла электроотрицательным полимером (эбонит) не изменяет направления переноса продуктов механодеструкции электроположительного полимера (фторопласт-4). Если искусственно создать условия, при которых потенциал электризации положительно заряженной пластмассы становится ниже потенциала металлического контртела (сталь), то перенос пластмассы на поверхность стали прекращается [340].

Наиболее интересным результатом работы [340] — его хотелось бы выделить особо — является иллюстрация выдвинутого авторами положения об электрической природе движущих сил переноса в системе полимер — металл на примере так называемого знакопеременного переноса. Последний осуществляется благодаря способности металла «изменять знак электрического заряда во фрикционном контакте в зависимости от знака заряда полимера», прямым следствием которой должен быть перенос продуктов механодеструкции электроположительного полимера, внесенных в зону трения пары сталь — электроотрицательный полимер, то в одном, то в другом направлении, пока обе сопряженные поверхности не покроются ими полностью. Непрерывная регенерация таких покрытий в виде тонких полимерных пленок — залог безызносности трущихся пар в условиях, запрещающих использование жидкостной смазки, что было убедительно подтверждено авторами в опытах с парой сталь — эбонит (потенциал электризации —600 В), когда фторопласт-4 (потенциал электризации +500 В) был использован как ротопринтная смазка.

Заметим, наконец, что исходя из представлений о влиянии электрических явлений на процессы переноса в системах металл — полимер открылись некоторые новые возможности и для объяснения процесса наводороживания металла, вызываемого, как известно, охрупчивание и диспергирование деформируемого трением слоя [358]. Водород выделяется при активации трением реакций дегидрогенизации углеводородов пластмассы; его поставщиком могут быть продукты термодеструкции органического связующего. Диффузионный поток водорода в стали направлен в область с максимальной температурой, расположенную на некоторой глубине от поверхности трения<sup>1</sup>, где водород хорошо растворяется [359]. Согласно [358, 360], водород, поглощаемый металлом, способен диссоциировать, причем именно уникально малый размер протона ( $1 \cdot 10^{-12}$  см) и его противоположный заряд по отношению к металлу помогают ему довольно легко проникать в решетку. В этом, в частности, и проявляется участие электризации трением в наводороживании поверхности стали.

<sup>1</sup> Такое смещение зоны с максимальной температурой, встречающееся в литературе под названием «температурного ножа», было теоретически обосновано В. А. Кудачиным.

#### § 4. Эффект электрической изоляции инструмента при обработке диэлектрика

Излагаемый ниже материал имеет своей основной целью обратить самое пристальное внимание читателя на электрические явления при резании в системах *металл — диэлектрик*. Своего рода переходной разновидностью механической обработки, включающей как элементы резания, так и элементы «чистого» трения (в отличие, например, от трения на передней поверхности инструмента), является шлифование. Исследованию электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования, посвящена работа [361]. Не входя здесь в рассмотрение специфики условий контактной и трибоэлектризации при шлифовании, отметим лишь, что эти явления были удачно использованы Лысовым, сумевшим установить связь между технологическими параметрами шлифования (скорость съема металла, стойкость круга) и статистическими характеристиками процесса электризации шлифуемой заготовки, потенциал которой непрерывно изменяется вследствие переходов электрических зарядов через зоны ее контакта с абразивным кругом, носящих случайный характер. Информацию о состоянии режущей поверхности круга, которая содержится в электрических сигналах, возникающих в процессе шлифования, предлагается, естественно, использовать для автоматизации шлифовальных работ<sup>1</sup>.

Как мы уже видели, одним из способов повышения стойкости электропроводящего инструмента при резании металлов является замыкание термоэлектрической цепи *инструмент — деталь — станок*. Такое замыкание, при котором электроизоляционный слой может быть расположен в любом месте цепи, осуществляется с помощью различных устройств, в том числе изолирующих инструмент от станка в электрическом отношении. Использование этих устройств при резании диэлектрических материалов считалось лишеным смысла, поскольку сам диэлектрик является изолятором. Выяснилось, однако, что в случае, когда новая технологическая оснастка обеспечивает надежную изоляцию инструмента от Земли (от заземленного станка), ее применение при обработке диэлектриков может также оказаться целесообразным [30].

Эффект «отключения Земли» был обнаружен в цеховых условиях при изготовлении большой партии деталей из полистилена на горизонтально-фрезерном станке модели 6М82. Полиэтиленовые заготовки обрабатывались дисковыми прорезными сборными фрезами диаметром до 160 мм, материал вставных ножей — быстрорежущая сталь P18. Минутная подача состав-

ляла 300 мм/мин, глубина фрезерования — 35 мм при числе оборотов шпинделя, равном 300 об/мин (без изоляции) и 500 об/мин (с изоляцией). Двусторонняя электрическая изоляция оправки с фрезами осуществлялась с помощью цилиндрической и конусной втулок, каждая из которых собиралась из двух частей на клею БФ-4.

При работе без изоляции фрезы перетачивались через 2—3 смены, тогда как изолированный инструмент продолжал непрерывно работать около 60 смен (кончилась партия деталей), несмотря на то что скорость фрезерования увеличилась более чем в полтора раза. Кроме того, было установлено, что в случае электрической изоляции инструмента от Земли станочник перестал подвергаться опасности воздействия на него электрических разрядов.

Согласно [30], в основе описанного эффекта могут лежать электростатические явления.

При обработке диэлектриков резанием инструментом из электропроводящего материала на заземленном станке обрабатываемая деталь и отделяемая от нее стружка электризуются. Схематически этот процесс можно представить следующим образом. Как только инструмент входит в контакт с деталью, начинается переход электронов (или ионов) через границу раздела *металл — диэлектрик*, в результате чего поверхности соприкосновения инструмента и детали заряжаются противоположными по знаку зарядами. Процесс электризации детали, перемещающейся относительно инструмента, будет охватывать все новые ее области. Положительный или отрицательный заряд, переходящий на диэлектрик, непрерывно восполняется благодаря большой емкости системы *инструмент — станок — Земля*. По мере обработки диэлектрика электрические заряды на нем накапливаются, причем напряженность создаваемого ими поля оказывается, вероятно, настолько большой, что имеет место явление электрической эрозии инструмента.

Отсюда следует, что для повышения стойкости инструмента необходимо уменьшать электризацию обрабатываемой детали. Эта задача и решается посредством электрической изоляции инструмента от Земли, при этом электроизоляционный слой располагается между инструментом и станком. Приведенные в соприкосновение инструмент и деталь по-прежнему заряжаются. Однако при их относительном перемещении инструмент перестает отдавать заряды изделию. Не будучи соединенным с Землей, он ведет себя как заряженное тело, поле которого препятствует переходу электронов (ионов) через границу раздела *металл — диэлектрик*. Поэтому в случае электрической изоляции инструмента от Земли сообщение значительного по величине заряда диэлектрику оказывается невозможным, обрабатываемая деталь наэлектризована слабо и электроэрозионный износ инструмента (в нашем опыте — фрез) уменьшается.

<sup>1</sup> Как видно, по цели, задачам и даже методам их решения данное исследование имеет много общего с работами, рассмотренными в гл. IV, § 3.

В пользу предположения о том, что электроэрозионная форма износа сосуществует с другими его видами, говорит тот факт, что трение металла о диэлектрик сопровождается электрическими разрядами. Благодаря этим разрядам трущаяся пара превращается в источник электромагнитного излучения, которое воспринимается антенной, подключенной к осциллографу (всплески на экране) или к радиоприемнику (характерные щелчки, потрескивание).

Проследить за тем, как быстро заряжается инструмент при обработке диэлектриков резанием, можно с помощью схемы, показанной на рис. 121. При точении деталей из пластмассы, дерева, оргстекла и других

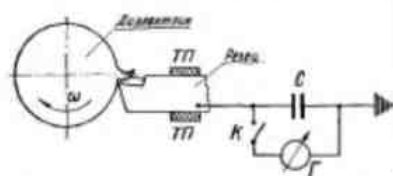


Рис. 121. Схема измерения заряда реза

материалов конденсатор  $C$ , соединенный с режцом, изолированным от станка текстолитовыми прокладками  $ТП$ , заряжается. Величина и знак заряда определяются по отбросу баллистического гальванометра  $Г$  при замыкании ключа  $К$ .

Возможность электроэрозионной формы износа как преобладающей не нашла пока прямого экспериментального подтверждения и, стало быть, вопрос о механизме эффекта, обнаруженного при фрезеровании полиэтилена, имеет дискуссионный характер. Автор не исключает, например, что согласно изложенным выше представлениям, в условиях разрыва в полиэтилене  $C-S$  связей, что соответствует работе  $\sim 80$  ккал/моль [32], снижение электризации его поверхности путем искусственного ограничения переходящего на нее заряда может резко ослабить перенос ионов металла, вызывающий износ инструмента.

В заключение отметим, что, по имеющимся у автора сведениям, в качестве эффективного способа борьбы с износом алмазного инструмента в США применяется так называемое «электростатическое охлаждение», понижающее температуру в зоне резания за счет разряда статического электричества на вспомогательный электрод, подводимый к самой режущей кромке и перемещающийся вместе с алмазным инструментом. Физическая суть этого явления, по-видимому, та же, что и у рассмотренного нами эффекта, только в данном случае мы имеем дело не с ограничением естественной подкачки зарядов, а с их искусственным непрерывным отсосом.

## Глава VII

### НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТА

#### § 1. Введение

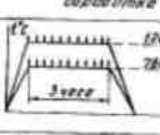
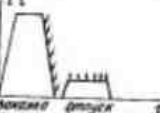
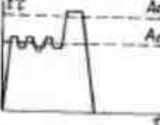
Одним из вопросов, тесно связанных с проблемой электрофизических процессов при обработке резанием, является возможность повышения стойкости инструмента под воздействием магнитного поля<sup>1</sup>. Из литературы известно, например [362—365], что путем магнитной обработки режцов и сверл из быстрорежущей стали удается получить двукратное увеличение их стойкости при резании конструкционных материалов. Одним из основных достоинств этого способа является его простота, поэтому в последнее время он начинает находить все более широкое применение. В то же время следует подчеркнуть, что еще в 1913 году было обнаружено изменение магнитных характеристик железокремнистого сплава в результате наложения магнитного поля при термической обработке [366]. Лишь спустя 16 лет началось изучение влияния магнитного поля на фазовые превращения и механические свойства сталей [367]. Некоторое общее представление о результатах исследований в области термомагнитной обработки дает табл. 23, составленная на основании анализа работы [368].

Как показал обзор этих исследований, в целом ряде из них согласованно подтверждается тот факт, что закалка в магнитном поле без отпуска или с низким отпуском приводит к увеличению предела прочности сталей. В случае среднего или высокого отпуска термомагнитная обработка приводит к тем же результатам, что и обычная термическая обработка. Наложение магнитного поля при отпуске быстрорежущей стали стимулирует переход остаточного аустенита в мартенсит с одновременным превращением тетрагонального мартенсита в кубический.

На основании именно этих представлений в работе [365] была сделана попытка раскрыть ту роль, которая может принадлежать магнитному полю в увеличении износостойкости сверл и режцов, изготовленных из быстрорежущих сталей Р9, Р9К5, Р18, Р18К5. Было показано, что независимо от того, в намагни-


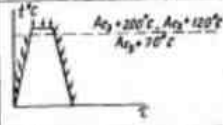
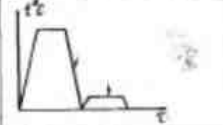
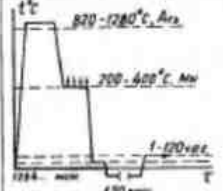
<sup>1</sup> Этот вопрос несколько выходит за рамки электрических явлений в зоне контактного взаимодействия, так как намагничивание инструмента в сильных магнитных полях сопровождается структурными изменениями, происходящими в его материале.

Таблица 28  
Влияние магнитного поля на свойства сталей при  
термомеханических воздействиях

Лк п.п.	Марка инстру- мента	Схема воздействия	Вид и напряже- ние магн. поля, З	Изменение физико-механических свойств					
				H <sub>c</sub> X	HV H	C <sub>г</sub> C <sub>г2</sub>	δ ψ	S <sub>к</sub> D <sub>к</sub>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Молда инстру- мент град В	Отжиг в магнитном поле	(~)	<	>				
2	P18 Ст 7 У8	Повышенный нагрев и выдерживание старения при 100°C в магнитном поле	(=) 1500		>				
3	арма- железо Ст 7	Нагрев и отжиг в магнитном поле	(=)		=				
4	Ст 3	Растяжение в магнитном поле	(=) 500-700 (~) 500-700			<	<		
5	Ст 45	Термомеханикомагнитная обработка					=	<	
6	арма- железо		(=) 20-800	Изменение микроструктуры: дробление и двойное выделение зерен феррита					
7	P8 ШХ15 ШХ15Г		(=) 9500 (~) 200					>	
8	40X		(=) 10000					>	

ченном (с любой полярностью режущей части) или размагниченном состоянии находился магнитно обработанный инструмент, его стойкость повышалась в 1,5-2 раза при различных режимах резания. Магнитная обработка резцов и сверл в переменном поле напряженностью до  $3,2 \cdot 10^5$  А/м давала увеличение стойкости того же порядка, что и намагничивание в постоянном поле напряженностью до  $5,6 \cdot 10^5$  А/м. Отсюда было сделано заключение, что воздействие сильного магнитного поля может приводить к изменениям в структуре материала инструмента. Автор спра-

Таблица 28  
(продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	ЛПН16 ЛПН16КЗ		(~) 18000					>
10	П10Н8		(=) 1200					>
11	ПВН16 ПВН18 ПВН12		(Л) 200000					>
12	+150 4340 1018 A151 (США)		(=) 750- 1500					>

Обозначения: H<sub>c</sub> - коэрцитивная сила; X - максимальная магнитная проницаемость; HV - твердость по Гейдлеру; HН - твердость по Виккерсу; C<sub>г</sub> - предел прочности; C<sub>г2</sub> - предел упругости; δ - относительное удлинение; ψ - относительное сужение; S<sub>к</sub> - порог хладноломкости; D<sub>к</sub> - ударная вязкость;  
магнитные поля: (=) - постоянное; (Л) - импульсное; (~) - переменное;  
изменение свойств: > (<) - увеличение (уменьшение); ≈ - незначительное увеличение (уменьшение); = - без изменения.

ведливо замечает, что после общепринятого трехкратного отпуска содержание аустенита в быстрорежущей стали сведено до минимума, поэтому маловероятно, чтобы дальнейшее аустенитно-мартенситное превращение в ней под влиянием магнитного поля явилось причиной улучшения ее режущих свойств сразу после термической обработки. Иначе обстоит дело, если инструмент был подвергнут зиточке и на его рабочей поверхности образова-



ся вторично закаленный слой с большим содержанием (40–80%) остаточного аустенита [369]. Такая система, наоборот, может оказаться весьма чувствительной к воздействию магнитного поля при сообщении ей энергии активации, необходимой для  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. В подтверждение данной гипотезы были приведены результаты опытов, согласно которым стойкость обычных и магнитно обработанных резцов оказалась одинаковой, когда последние подвергались продолжительной шлифовке уже после пребывания в постоянном ( $5,6 \cdot 10^6$  А/м) или переменном ( $3,2 \cdot 10^6$  А/м) поле.

Что касается вывода работы [365] о характере структурных изменений под влиянием магнитного поля, то, как будет показано ниже, он не является единственно возможным. Здесь же мы обратимся к вопросу о том, каким образом магнитное состояние инструмента способно отразиться на его стойкости.

По мнению исследователей, впервые осуществивших резание намагниченным инструментом [370], присутствие магнитного поля вызывает изменение температуры в зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов за счет нечетных термомагнитных эффектов. С этой точки зрения, казалось бы, весьма трудно объяснить тот факт, что стойкость резцов увеличивалась и после такой магнитной обработки, в результате которой их суммарная намагниченность оставалась равной нулю. Согласно [362], однако, приобретение сталью магнитной текстуры может благоприятно отразиться на стойкости: оно облегчает намагничивание инструмента, которое происходит в процессе резания под влиянием локальных полей, сцепленных с внутренними термоэлектрическими контурами.

Как и авторам работы [371], нам представлялась весьма сомнительной возможность использования термомагнитного эффекта Риги—Ледюка для управления тепловым потоком в зоне резания, где скорость дрейфа носителей тепла (заряда) сравнительно мала [31]. Даже с учетом особенностей энергетического электронного спектра, связанных с образованием на поверхностях твердых тел полупроводниковых окисных пленок, предполагалось, что масштабы указанного эффекта в инструментальном материале недостаточно велики, чтобы вызвать ощутимое снижение температуры в очаге интенсивного теплообразования. Аналогичный вывод предположительно вывод был сделан автором работы [365] на основании результатов измерений температуры в зоне резания. Однако, согласно модельным исследованиям изменения направления теплового потока в стали Р18 под влиянием магнитного поля [372], поперечный нечетный термомагнитный эффект в ней может быть значительным благодаря полупроводниковым (карбидным) неоднородностям (с проводимостью  $p$ -типа).

Другой причиной изменения стойкости намагниченного инструмента могут быть процессы, протекающие в зоне резания благодаря явлению электромагнитной индукции [300]. Особый

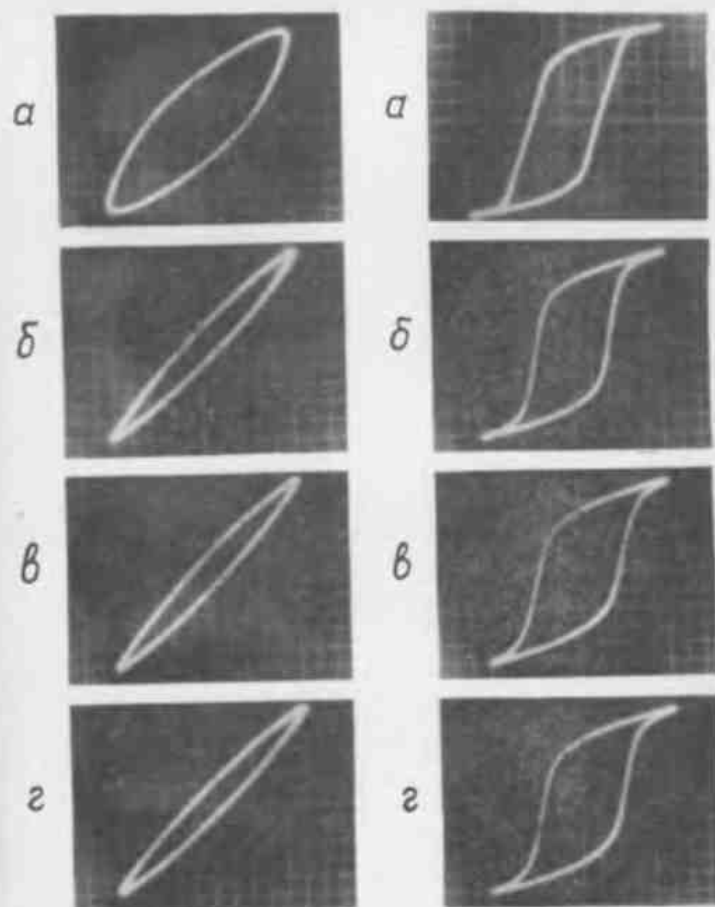


Рис. 122. Динамические гистерезисные петли, снятые в режиме, далеком от насыщения ( $H_m = 2500$  А/м) [373]: а — сталь У7А ( $B_m = 0,202$  Тл), б — сталь Р6М5 ( $B_m = 0,070$  Тл), в — сталь Р9К5 ( $B_m = 0,098$  Тл), г — сталь Р18 ( $B_m = 0,54$  Тл)

Рис. 123. Динамические гистерезисные петли, снятые в режиме насыщения ( $H_m = 20000$  А/м) [373]: а — сталь У7А ( $B_m = 0,70$  Тл), б — сталь Р6М5 ( $B_m = 0,23$  Тл), в — сталь Р9К5 ( $B_m = 0,48$  Тл), г — сталь Р18 ( $B_m = 0,54$  Тл)

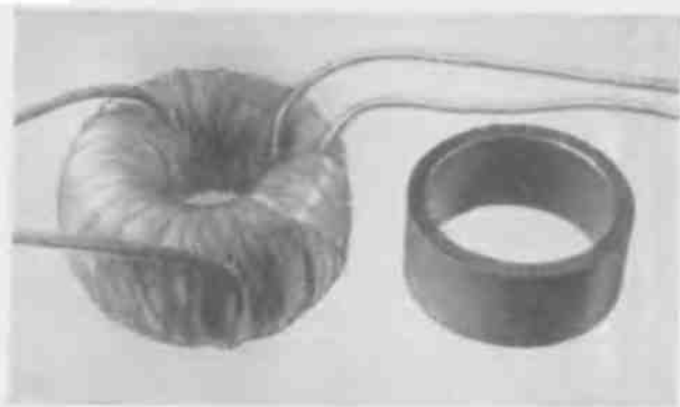


Рис. 124. Кольцевые образцы для снятия магнитных динамических характеристик.

интерес среди них вызывает дополнительное тепловыделение, которое возникает из-за вихревых токов. Сравнение динамических циклов намагничивания показывает, что интенсивность такого тепловыделения при различных сочетаниях инструментального и обрабатываемого материалов далеко не одинакова. Согласно данным работы [373], площадь гистерезисной петли, снятой в динамическом режиме, значительно больше у высокоуглеродистой стали У7А, чем у вольфрамовых быстрорежущих сталей Р18, Р9К5, Р6М5 (рис. 122 и 123). Петли были получены на кольцевых образцах (рис. 124) с помощью ферростра У-54Г. Хотя долей потерь, которая приходится на вихревые токи в инструментальных сталях, иногда пренебрегать нельзя, основными объектами исследования с точки зрения их магнитных динамических характеристик должны стать обрабатываемые материалы, в толще которых выделяется основная часть дополнительной тепловой энергии.

Что касается статических гистерезисных циклов, то они не могут дать представления о величине энергетических потерь, обусловленных токами Фуко. Следует, однако, заметить, что имеется тесная связь микроструктуры и свойств материала со статической коэрцитивной силой. Как известно из справочной литературы, например, сталь У7А, обработанная на зернистый перлит, имеет коэрцитивную силу 4 эрстед; она же, обработанная на пластинчатый перлит, имеет коэрцитивную силу 12 эрстед. Отожженные стали имеют в несколько раз меньшую коэрцитив-

ную силу, чем закаленные (16 эрстед против 80 эрстед у стали Р9К5, 10 эрстед против 80 эрстед у Р6М5). Указанная связь позволяет рассматривать определение коэрцитивной силы как один из методов неразрушающего контроля при технологических операциях изготовления и термообработки режущего инструмента [374].

Если количество тепла, выделяемого вихревыми токами, зависит от электропроводности обрабатываемого материала, то от его магнитных характеристик зависит притяжение стружки к инструменту-магниту. При резании магнитной стали, скажем 2Х13, такое притяжение (рис. 125) может отрицательно сказаться на стойкости инструмента, несмотря на другие положительные моменты, определяемые его намагничиванием. Значит, если причиной повышения стойкости являются изменения в структуре, а не ввод в зону резания магнитного поля, то инструмент, подвергнутый магнитной обработке, предпочтительнее иметь размагниченным. Кстати, тогда, как это следует из работы [30], в поведении микростружки при резании можно наблюдать также проявления магнетизма, которые связаны не только с образованием однодоменных ферромагнитных кристаллов, но и с упруго-магнитным взаимодействием твердых тел (см. § 4).

Следует подчеркнуть, однако, что при нагреве быстрорежущей стали наложение магнитного поля затрудняет обратное мартенситное превращение  $\alpha \rightarrow \gamma$  [375], в связи с чем содержание аустенитной фазы в поверхностных слоях инструмента, подвергнутого переточке, будет зависеть от его магнитного состояния. Поэтому, если исходить из представлений, изложенных в работе [365], то при решении вопроса о целесообразности размагничивания инструмента необходимо, по-видимому, учитывать, для обработки какого материала — магнитного, немагнитного или немагнитного — он предназначен.

Процесс резания намагниченным инструментом может рассматриваться как естественная механотермомагнитная обработка, и, как уже отмечалось автором ранее<sup>1</sup>, наложение внутренне-

<sup>1</sup> В докладе на научно-техническом семинаре «Современная технология производства приборов, средств автоматизации и систем управления» (Москва, 1973 г.).



Рис. 125. Головная часть намагниченного сверла (Р18) с приставшей к ней стружкой после выхода из магнитной стали (2Х13).

го магнитного поля инструмента на фазовые превращения в зоне резания может существенно повлиять на характер взаимодействия атомно-электронных систем. В то же время первопричина долговечности магнитно обработанного инструмента кроется, вероятно, в изменении собственной дислокационной структуры быстрорежущей стали под влиянием внешнего магнитного поля. Что касается твердосплавных резцов, то по отношению к различным вариантам магнитной обработки они практически оказались нечувствительными [365] из-за относительно малого содержания ферромагнитного кобальта в твердом сплаве [362]. Кстати, насыщенность последнего карбидами могла бы привести к значительному термомагнитному эффекту в присутствии внешнего магнитного поля [372], которое легко создается охватывающим инструментом соленоидом.

## § 2. Повышение стойкости сверл путем импульсной магнитной обработки

Поисковая серия опытов предусматривала сравнительную оценку износостойкости следующих партий сверл из быстрорежущей стали HSS диаметром 8,5 мм:

- в состоянии поставки;
- нагретых до 725°C и охлажденных в масле;
- нагретых до 725°C и охлажденных в масле с одновременным наложением импульсного магнитного поля ( $\sim 10^5$  А/м);
- нагретых до 875°C и охлажденных в масле;
- нагретых до 875°C и охлажденных в масле с одновременным наложением поля;
- намагниченных в поле без термообработки.

Сопоставление среднего числа отверстий, просверленных указанными партиями сверл в стали 0X18H10T (прокат, поковка) до их однократного затупления, привело к следующим результатам:

— сверла, термообработанные по пунктам б и в, оказались совершенно непригодными для использования из-за отпускной хрупкости второго рода;

— сверла, обработанные по пункту г, показали относительно большую стойкость, нежели сверла в состоянии поставки. Этот результат объясняется, по-видимому, тем, что из-за неполного погружения сверл в масло их закалка сопровождалась самоотпуском, вследствие чего твердость инструмента постепенно понижалась в направлении от его режущей части к центру и хвостовику;

— наложение магнитного поля несколько снизило эффект самоотпуска, хотя и в этом случае стойкость сверл была выше, чем в состоянии поставки;

— увеличение стойкости сверл по сравнению с исходной на-

блюдалось и при их намагничивании без термообработки, что оказалось наиболее приемлемым из рассмотренных вариантов с технологической точки зрения.

Если обратиться к табл. 24, можно легко убедиться в том, что путем магнитной обработки (МГО) быстрорежущего инструмента удается получить заметное увеличение его стойкости при резании целого ряда материалов.

Таблица 24

Повышение стойкости режущего инструмента путем магнитной обработки

Обрабатываемый материал	Материал инструмента	Вид инструмента	Режим резания			Коэффициент эффективности $K_{\text{МГО}}$	Литературный источник
			$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	$f$ , мм		
40X	BK8	Резец	120	0,11	1,0	1,3	[362]
		Сверло	26	0,28	—	1,6	»
		Ø 22	47	0,22	—	2,0	»
»	P18	Резец	55+65	0,11	1,0	1,7+2,0	[363]
		»	—	—	—	2,3	[364]
ШХ15	»	»	—	—	—	—	—
Сталь 30	P6M3	Сверло Ø 25	—	—	—	3,7	»
Сталь 45	P18	Сверло Ø 12	—	—	—	2,0	»
СЧ18-36	P6M5	Сверло Ø 14	—	—	—	2,6	»
Сталь 45	P18K5	Резец	50+60	0,4	1,0	2,0+1,6	[365]
		»	80	0,2	»	2,0	»
		»	110	0,1	»	»	»
»	P9	Сверло Ø 12,5	26	0,16	—	»	»
		Резец	150+230	0,4	1,0	1,0	»
С421-40	BK6	»	125+200	0,1	0,5	»	»

Чтобы выяснить основную физическую причину эффекта магнитной обработки, необходимо было добиться его устойчивой воспроизводимости. В качестве объекта лабораторных и производственных испытаний были отобраны сверла из стали P18. Для намагничивания этих сверл использовалось импульсное магнитное поле напряженностью более 1,0 тыс. эрстед. Общий вид установки, создающей поле, показан на рис. 126, ее принципиальная схема<sup>1</sup> — на рис. 127. Принцип работы установки основан на длительном накоплении электрической энергии на зарядной емкости С3 и кратковременном ее разряде на катушку индуктивности L. Запуск тиристора ТГИ1-400/3,5 (Т72), выполняющего функцию низкоомного электронного коммутатора, осуществляется с помощью самовозбуждающегося блокинг-генератора, собранного на лампе 6Н14П (Л1).

Двукратное увеличение стойкости сверл наблюдалось при амплитудном значении тока в намагничивающей катушке около

<sup>1</sup> Разработана А. Д. Овчинниковым.



Рис. 126. Опытный образец установки для магнитной обработки инструмента (УМО-1)

400 А ( $H \sim 10^5$  А/м), когда импульсы длительностью  $\sim 30$  мкс следовали с частотой от 3 до 4 Гц. В то же время увеличение тока в катушке с одновременным снижением частоты следования импульсов до 1 Гц и ниже приводило не только к исчезновению эффекта, но и к заметно меньшей, по сравнению с исходной, стойкости инструмента, износ которого приобретал черты, характерные для хрупкого скалывания.

При напряженных в тепловом отношении условиях заточки,

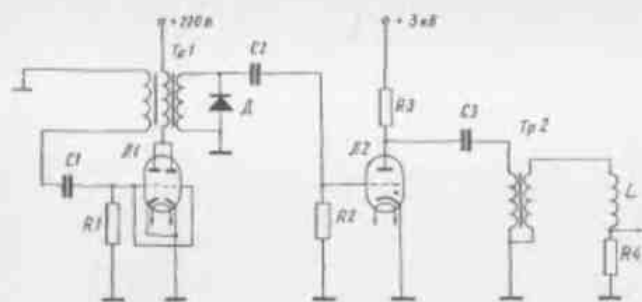


Рис. 127. Принципиальная электрическая схема УМО-1

когда осуществлялось резание стали Ст3, эффект магнитной обработки уменьшался на 15—25% после двух-трех переточек сверл. Последующее снижение стойкости инструмента до исходной, т. е. до стойкости сверла, не подвергавшихся воздействию импульсного магнитного поля, происходило, как правило, довольно быстро.

Когда сверлилась сталь Х18Н10Т, а заточка осуществлялась алмазным кругом с применением смазочной пасты на основе олеиновой кислоты, проявление эффекта магнитной обработки оставалось практически тем же, несмотря на большое число переточек [376]. Опыты проводились на вертикально-сверлильном станке модели 2Н118 с применением в качестве смазочно-охлаждающей жидкости 5%-ного раствора эмульсола. С обеих сторон заготовок, нарезанных из одного прутка, сверлились глухие отверстия на глубину 15 мм. Использовались сверла диаметром 8 мм, подвергнутые контролю по геометрическим параметрам (длина сверла, диаметр и длина его рабочей части, ширина ленточки, длина режущих кромок, угол наклона спиральной канавки), биению ленточек и твердости рабочей части (ГОСТ 2034—64). Для основ-

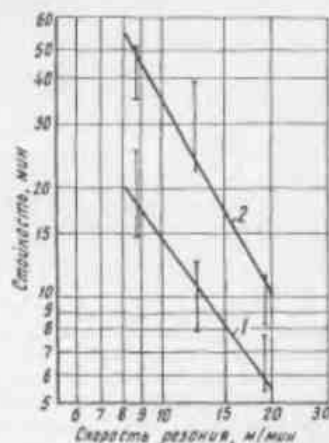


Рис. 128. Зависимость стойкости сверла из стали Р18 от скорости резания до (1) и после (2) магнитной обработки

ной серии испытаний были отобраны сверла с примерно одинаковой интенсивностью износа до установленного критерия затупления по задней грани.

Результаты исследования в виде стойкостных зависимостей  $T=f(v)$ , снятых при подаче, равной 0,14 мм/об, приведены на рис. 128. Из сопоставления этих зависимостей следует, что в области рекомендуемых на практике скоростей резания стойкость магнитно обработанного инструмента повышается более чем в 2 раза, что авторами работы [376] объясняется с точки зрения излагаемой ниже гипотезы о магнитоупрочнении и магнитодисперсионном твердении инструментального материала. Снижение критерия эффективности  $K_{\text{эф}}$  при переходе на более жесткие режимы, согласно [376], обусловлено разупрочнением материалов под действием высоких температур в зоне резания.

В ходе производственных испытаний, непосредственно перед тем как осуществлялся процесс резания стали 40X, намагниченные сверла затачивались электрокорундовым кругом. В зависимости от технологических условий стойкость таких сверл повышалась по сравнению с исходной в 1,5-2,5 раза. Результаты производственных испытаний магнитно обработанных быстрорежущих сверл отражает табл. 25.

Таблица 25

Повышение стойкости инструмента из стали P18, обработанного на установке УМО-1

Инструмент	Обрабатываемый материал	Режимы резания		Модель-станка	Критерий эффективности $K_{\text{эф}}$
		$v$ , м/мин	$s$ , мм/об		
Сверло $\varnothing$ 12,7	Сталь 45	21	0,2	2A135	2,0
Сверло $\varnothing$ 12,7	Сталь Ст3	21	0,2	2A135	2,3
Сверло-зенкер $\varnothing$ 22	Сталь Ст3	8,63	0,63	2H55	2,2
Сверло $\varnothing$ 6	40X	6,4	ручная	2A125	2,6
Сверло $\varnothing$ 6	40X	6,4	ручная	255	1,6
Сверло $\varnothing$ 6	40X	6,4	0,1	AM-427	1,8

Если касаться физической сущности закономерностей, управляющих износом магнитно обработанного инструмента, то немаловажным является вопрос о том, сохраняет ли он свою повышенную стойкость и после того, когда его суммарная намагниченность оказывается равной нулю. То обстоятельство, что размагниченные в переменном поле сверла могут иметь такую же стойкость, как и намагниченные [376], позволяет уже с большей определенностью говорить о структурных изменениях в быстрорежущей стали как о наиболее важном результате МГО инструмента.

### § 3. Магнитоупрочнение быстрорежущих сталей в импульсных магнитных полях

Анализ полученных данных говорит в пользу выдвинутой автором гипотезы, согласно которой увеличение стойкости магнитно обработанного инструмента происходит в результате магнитоупрочнения и магнитодисперсионного твердения быстрорежущей стали [31, 377]. Рассмотрим механизмы этих процессов, основываясь на некоторых известных представлениях.

В немагнитном состоянии ферромагнитная матрица стали разделена на множество доменов. При смещении междоменных границ и вращении спонтанной намагниченности под действием внешнего поля изменяются направления силовых моментов электронов, что сопровождается магнитоупрочнительной деформацией и, в соответствии с законом Гука, упругими напряжениями. Взаимодействие упругого поля, обусловленного магнитоупрочнением стали, с упругим полем ее реальной дислокационной структуры приводит к появлению локальных перенапряжений. В этих местах резко возрастает вероятность термофлуктуационного разрыва межатомных напряженных связей [310]. Именно здесь наиболее интенсивно идут процессы размножения и перемещения дислокаций и, таким образом, формируются очаги пластической деформации. С увеличением плотности дислокаций, когда разрастающийся лес дислокаций все более затрудняет их собственное движение в других, не относящихся к лесу плоскостях скольжения, инструмент претерпевает своеобразный наклеп, упрочняется [378]. Однако, если «ковать» быстрорежущую сталь импульсами со слишком высокими амплитудными значениями тока и мощности, то очень большое скопление дислокаций в междоменных границах, коммуницирующих между собой, вызывает снижение сопротивления стали хрупкому разрушению. Не исключена возможность, что ответственной за образование микротрещин является магнитоупрочнение парапроцесса, к которой предрасположены системы, имеющие  $\alpha\beta\gamma$  превращение с большим гистерезисом [379]. В таких системах энергия обменного взаимодействия (а она превосходит энергию магнитоупругого взаимодействия во много раз) может весьма сильно зависеть от величины межатомных расстояний. В то же время именно та сталь, режущие свойства которой после намагничивания улучшились, обнаружила изменение параметра решетки мартенсита, о чем легко судить по данным рентгеноструктурного анализа двух групп сверл (табл. 26). Эти данные были получены ионизационным методом на установке УРС-50ИМ (Сг-излучение). Относительная ошибка в определении параметра составляла  $10^{-4}$ . Как видим, воздействие импульсного магнитного поля привело к уменьшению межатомного расстояния примерно на  $8 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$ .

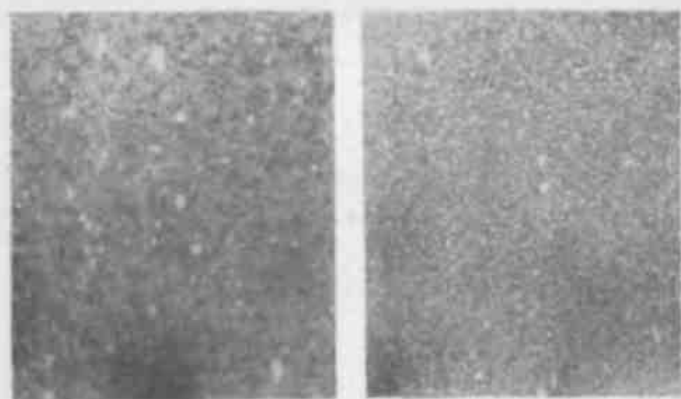
Значения параметра решетки при магнитострикционном упрочнении сверл из стали Р18

Состояние сверла	До магнитной обработки				После магнитной обработки			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Номер сверла								
$a, \text{Å}$	3,5153	3,5154	3,5153	3,5153	3,5146	3,5145	3,5146	3,5146

ной деформации быстрорежущей стали сопровождается измельчением карбидов. Такое измельчение согласуется с уменьшением размеров основных доменов при увеличении плотности дислокаций [380]. Но еще большую однородность структуре придает множество мелких карбидов, выделяющихся из основной фазы, которая становится метастабильной в процессе стрикционного упрочнения, вызванного ударными волнами. Согласно [381], под действием локальных напряжений может происходить сегрегация примесных атомов, и прежде всего атомов углерода на границах зерен и дислокациях. С образованием облаков Коттрелла резко возрастает вероятность флуктуаций концентрации углерода вдоль дислокаций, что и приводит к зарождению дискретных частичек карбидной фазы. Нетрудно видеть, что мы имеем своеобразную картину дисперсионного твердения, что подтвердилось при измерениях твердости и микротвердости нескольких партий образцов до и после намагничивания. Вместе с тем в быстрорежущей стали, подвергнутой магнитной обработке, наблюдается не только высокое содержание и более равномерное распределение карбидов. Отличительным признаком такой стали (см. рис. 129, б) является также более округлая форма карбидов, играющих, как известно, роль концентраторов напряжения. Приобретаемая карбидами округлость означает понижение поверхностной энергии на границе раздела с матрицей и, как следствие, повышение энергии активации разрыва межатомных связей в ее кристаллической решетке. Естественно, что прочностные характеристики инструментальной стали при этом улучшаются.

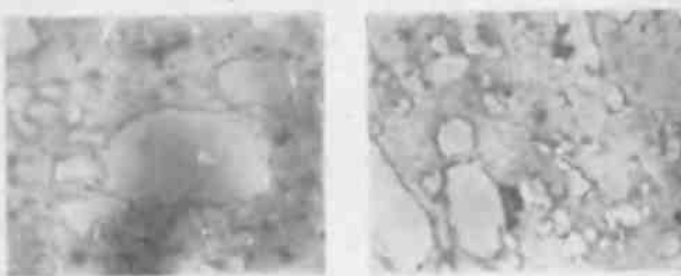


Рис. 131. Электрограмма карбидного включения в углеродной реплике стали



а

б

Рис. 129. Микрофотографии обычного (а) и магнитно обработанного (б) сверла из стали Р18 в сечении, параллельном осью.  $\times 310$ 

а

б

Рис. 130. Углеродные реплики стали Р18, нанесенные на протравленные поверхности сечений обычного (а) и магнитно обработанного (б) сверла под углом  $30^\circ$ .  $\times 5000$  (а) и  $\times 10\,000$  (б)

Микрофотографии шлифов стали и ее углеродных реплик, типичные для указанных групп сверл, приведены на рис. 129 и 130 соответственно. Темные места на изображении реплик появились в результате брагговского рассеяния электронов на прилипших к пленке кристаллических частичках карбидной фазы, идентифицированных с помощью микродифракции (рис. 131). Микрофотографии свидетельствуют о том, что процесс магнитострикцион-

Магнитоэрозионный налет, в отличие от механического, представляет собой не столько поверхностное, сколько объемное упрочнение металла. Снять его, то есть разупрочнить материал, можно, разумеется, нагреванием, особенно циклическим [382]. Поэтому при переточках инструмента, тем более осуществляемых в напряженном тепловом режиме, быстрорежущая сталь теряет свои повышенные прочностные свойства сравнительно быстро. Ослаблению эффекта магнитной обработки способствует также периодический неравномерный нагрев инструмента при попередном сверлении отверстий.

Следует [365], авторы допускают, что возможность снижения стойкости инструмента после нескольких первых переточек может быть связана с большим процентным содержанием остаточного аустенита в поверхностном слое стали. С целью превращения парамагнитного аустенита в ферромагнитный мартенсит считается необходимым подвергать инструмент магнитной обработке после каждой из его переточек. Такая мера, действительно, может оказаться полезной, хотя основная задача магнитной обработки сводится, как это уже отмечалось выше, к магнитоэрозионному упрочнению и магнитнодисперсионному твердению стали, а не к дополнительному распаду в ней остаточного аустенита.

В результате изложенного становится ясно, что магнитная обработка быстрорежущего инструмента может рассматриваться как один из перспективных методов повышения его стойкости, легко осуществимый технологически. Однако необходима более глубокая и систематическая разработка этого метода с целью его эффективного использования в промышленности.

В дополнение к изложенному остановимся на одном из экспериментальных исследований, упомянутых во введении к данной главе и помогающих осмыслению той роли, которую играют электрические и магнитные явления при трении и обработке резанием.

#### § 4. Упругомагнитное взаимодействие тел при напряженных режимах скольжения

При скольжении вращающегося цилиндрического образца из инструментальной стали по скрепленному с ним неподвижному цилиндрическому образцу материал последнего оказывает существенное влияние на поведение частиц износа (рис. 132). Многократное экспериментальное подтверждение этого факта было получено при таких режимах скольжения, которые по своей напряженности приближаются к условиям схода стружки по контактным поверхностям инструмента (диаметры образцов составляли 30 или 40 мм, приложенная нагрузка  $\sim 80$  Н, скорость скольжения  $\sim 1,5$  м/с). Поэтому здесь и в дальнейшем мы будем

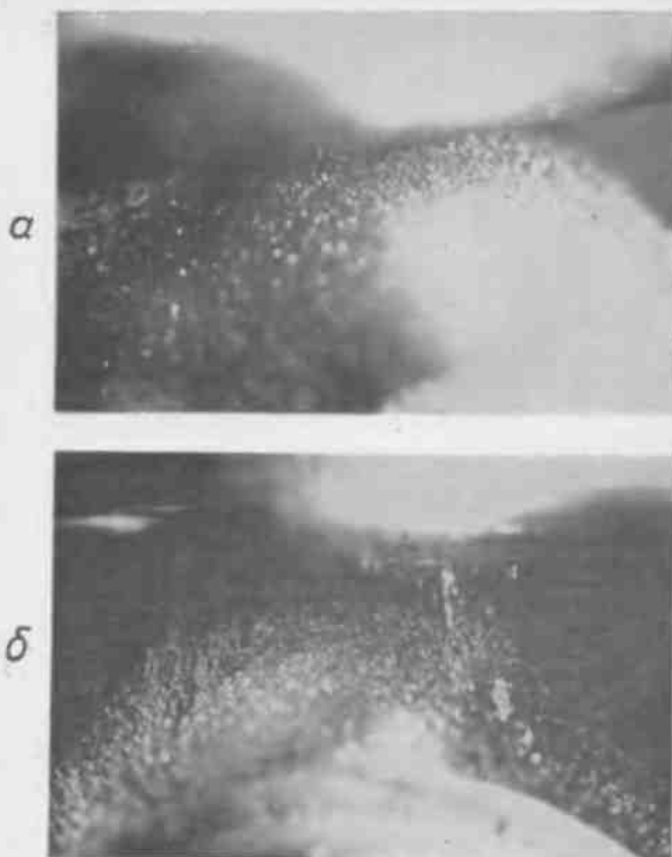


Рис. 132. Частицы износа, вылетающие из зоны frictionного взаимодействия быстрорежущей стали P9K5 с немагнитной сталью X18Ni9Ti (а) и с магнитной сталью 2X13 (б)

говорить о явлениях, относящихся к гетерогенному процессу, который наряду с трением окисленных физико-химически чистых поверхностей включает в себя элементы микрорезания.

В опытах с образцами из немагнитной стали траектории движения частиц, выброшенных из зоны скольжения, а также их

ориентации на поверхности неподвижного образца определяются действием только одного силового поля — гравитационного (рис. 132, а). В том случае, когда питцеванному износу подвергается образец из магнитного материала, поведение микростружки свидетельствует о том, что она оказывается под влиянием не только гравитационного, но и магнитного поля, которое действует на частицы износа с линейными размерами до 1 мм и даже более как на естественные ферромагнитные «опилки» (рис. 132, б). Поскольку оба скрещенных образца были предварительно размагничены, то естественно предположить, что появление магнитного поля связано с механомангнитным эффектом.

Попытаемся представить, что же происходит в самой зоне скольжения и в воздушном пространстве, принадлежащем ее окрестности. В условиях значительного преобладания тепловыделения над теплоотводом трение пара начинает постепенно переходить из атермического режима работы в режим термический (квазиадиабатный). Разрушение окисных пленок и увели-

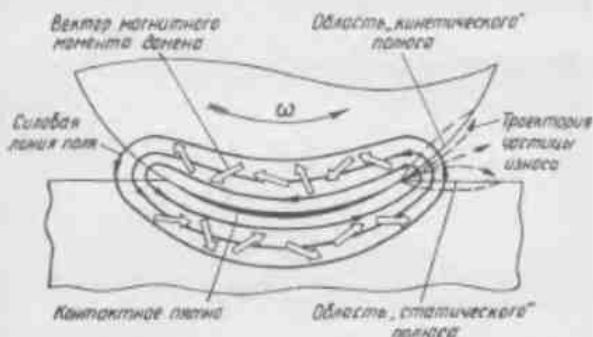


Рис. 133. Магнитное поле внутри и вне зоны скольжения при упругомагнитном взаимодействии трущихся тел.

чение интенсивности тепловых колебаний атомов приводят к схватыванию и диффузионному спеканию материалов. Колеблюсь тел, находящихся в состоянии относительного скольжения, вызывает появление механических деформаций сдвига по обе стороны от их поверхности раздела. При искажении решеток кристаллитов, находящихся в области упругих напряжений, характер магнитного взаимодействия атомов изменяется. Происходит переориентации магнитных моментов областей спонтанного намагничивания, причем энергетически более выгодным оказывается такое их расположение, при котором линии магнитной индукции как бы «окольцовывают» контактное пятно и прилегающие к нему слои (рис. 133). В непосредственной близости к поверхности

раздела ферромагнетик деформируются и, следовательно, намагничиваются сильнее, поэтому в воздушном промежутке между образцами напряженность магнитного поля убывает особенно быстро по мере удаления от контактного пятна.

С помощью такой картины поля нетрудно объяснить его влияние на поведение частиц износа. Микростружка, выброшенная из зоны скольжения, притягивается к полюсам, образующимся на поверхностях образцов. Она густо уснащает ту часть «статического» полюса, которая близко примыкает к контактному пятну, выстраиваясь на ней в виде своеобразного «магнитного частокола». При разделении трущихся поверхностей наблюдается смещение (миграция) этого частокола по направлению к областям сильного намагничивания. Те частицы, которые оказываются под преобладающим влиянием «кинетического» полюса, движутся по восходящим траекториям и, будучи притянутыми к вращающемуся образцу, могут транспортироваться им в зону скольжения в качестве абразива. Полет одной из таких частиц показан на рис. 134.

С увеличением продолжительности скольжения преобладание кинетического полюса над статическим становится особенно заметным. Проявление трибомагнитного эффекта выражается теперь в том, что магнитный частокол на поверхности неподвижного образца относительно быстро редет: все большее число частиц отрывается от статического полюса и устремляется к кинетическому. Причина такого поведения микростружки кроется, вероятно, в асимметрии процесса скольжения. Температурный градиент в неподвижном теле, один и те же участки которого приходят в соприкосновение с постоянно чередующимися участками вращающегося тела, значительно выше. Вот почему именно в слоях, прилегающих к контактному пятну со стороны неподвижного образца, снижение упругих напряжений за счет разрыва нежизнеспособных



Рис. 134. Кадры скоростной киносъемки, демонстрирующие полет частицы, удерживаемой кинетическим полюсом, и ее адаптацию на поверхности образца. Моменты наблюдения ( $\times 10^3$ , с): 0 → 1 → 5 → 6 → 9 → 11



связей, осуществляемого тепловыми флуктуациями, происходит значительно раньше. В этих условиях упругомагнитный эффект и обусловленная им магнитная текстура начинают исчезать в первую очередь, что и влечет за собой уменьшение намагниченности в области статического полюса. Кроме того, следует учитывать то дополнительное ослабление трибомагнитного эффекта, которое связано с резким уменьшением удельной нагрузки на пятне при увеличении его площади.

Интересно отметить, что явления, аналогичные описанным выше, наблюдаются и при обработке металлов резанием. Согласно [383], например, лишь часть очень малых частиц обрабатываемого материала, т. е. частиц, граничащих с металлической пылью, оседает на передней грани инструмента и по мере накопления спадает на станок; «другая же часть их более или менее в зависимости от режима густой «щеткой» пристает к нижним частям главной и вспомогательной задних граней так, как пристаю железные опилки к магниту». Логично предположить, что в основе такого рода явлений, свойственных процессам трения и резания, наряду с образованием однодоменных ферромагнитных кристаллов, лежит упругомагнитное взаимодействие твердых тел.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из того неполного обзора исследований, с которым читатель познакомился выше, отчетливо видно, что современный интерес к электрическим явлениям при трении и резании твердых тел отражает два принципиальных вопроса. С одной стороны, возможность управления такими явлениями служит основой для развития новых способов и средств повышения долговечности трущихся пар и режущего инструмента. Это вопрос технологический и электрохимических процессов, протекающих при контактно-взаимодействии твердых тел, означало бы приподнять завесу над всем комплексом явлений, свойственных процессам трения и резания. Это вопрос научный.

Насколько сложны как первый, так и тем более второй вопросы, показала крайняя противоречивость взглядов на роль электрических явлений уже в начальной стадии их изучения, когда мало кто верил, что на фоне интенсивных деформационных и тепловых процессов эта роль может оказаться существенной. Вот почему попытка автора систематизировать и критически осмыслить экспериментальный и теоретический материал в данной области оправдывается хотя бы тем, что она не оставляет сомнений в перспективности исследований трибоэлектричества в широком смысле этого слова.

При разработке проблемы электрических явлений выделялся ряд новых методов исследования, таких, как совместное измерение работы выхода электрона и интенсивности экзотермической эмиссии в процессе контактного взаимодействия, одновременная регистрация интегральной э.д.с. и электрического сопротивления контакта, гармонический анализ спектров колебаний интегральной э.д.с., расчет эквивалентных электрических схем фрикционных систем, снятие вольт-амперных характеристик граничных смазочных слоев и окисных пленок и т. д. Привлечение этих методов, наряду с оптической и электронной микроскопией, высокотемпературной рентгенодифрактометрией, нейтронным активационным анализом и т. п., позволяет получить информацию об интимных сторонах процесса контактного взаимодействия тел. Возможность следить за ходом процессов трения и резания с помощью указанных методов создает все новые предпосылки сделать эти процессы управляемыми и даже самоуправляемыми.

Как читатель уже убедился, аспектов, по которым может идти развитие и углубление взглядов, относящихся к области трибоэлектрических явлений, очень много. Дальнейшая разработка электромагнитной теории трения, электрохимических основ явле-

ния избирательного переноса, энергетической флуктуационной гипотезы образования когезионного шва, теории электрического состояния граничных смазочных слоев и окисных пленок, способов поляризации фрикционных систем, оценки преобладающего вида износа по спектру переменной составляющей э.д.с., изменения структурного состояния материалов под воздействием импульсных магнитных полей и т. д. — все это актуальные задачи, которые будут, по-видимому, решены в ближайшие годы. При этом вопрос о целесообразности практического применения тех или иных электрических явлений, в частности при комплектовании фрикционных систем с точки зрения обеспечения оптимальных условий их работы, должен решаться с учетом новых теоретических представлений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические явления при трении и резании металлов. М., «Наука», 1969.
2. Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. М., «Наука», 1973.
3. Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной научно-технической конференции «Электрохимические процессы при трении и использование их для борьбы с износом». Одесса, 1973.
4. Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смагина В. П. Адгезия твердых тел. М., «Наука», 1973.
5. Дерягин Б. В., Абрикосова И. И., Лифшиц Е. М. — «УФН», 64, 3, 493 (1956).
6. Ахатов А. С. — В кн.: Исследования в области поверхностных сил. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 93.
7. Ахатов А. С., Учуматкин Г. Н. [2], с. 7.
8. Буфеев В. А. [3], с. 7.
9. Постников С. Н. — В кн.: Вопросы электрофизики трения и обработки резанием. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 30, 4, 4 (1974).
10. Сидоров В. П., Гулякова Г. П., Соколов Л. Д. Там же, с. 11.
11. Учуматкин Г. Н. [2], с. 35.
12. Евдокимов В. Д., Семов Ю. И. Экзоэлектронная эмиссия при трении. М., «Наука», 1973.
13. Постников С. Н., Яшина А. Н. — «Изв. высш. учеб. заведений. Физика», 1967, № 7, с. 66.
14. Постников С. Н. — «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 22, 1, 117 (1966).
15. Мельниченко И. М. — В кн.: Вопросы электрофизики трения и обработки резанием. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 30, 4, 17 (1974).
16. Постников С. Н. — В кн.: Разработка и применение смазочно-смазочных жидкостей при резании металлов. М., Изд. МДНТИ им. Ф. Э. Дзержинского, 1966, № 2, с. 54.
17. Postnikov S. N. — «Wear», 10, 2, 142 (1967).
18. Постников С. Н., Теплов С. В. — «Машинист», 1967, № 5, с. 11.
19. Постников С. Н., Стародубренская И. Н. — В кн.: Трение, смазка, износ. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 24, 11, 41 (1968).
20. Кретьинин О. В. — В кн.: Вопросы технологии машиностроения. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 26, 4, 33 (1970).
21. Гордиенко П. Л., Гордиенко С. Л. — «Вестник машиностроения», 1952, № 7, с. 38.
22. Дубров Ю. С., Николаева Г. С. [1], с. 56.
23. Опитц Г. — В кн.: Новые работы по трению и износу. М., ИЛ, 1959, с. 85.
24. Рывкин А. А. [1], с. 70.
25. Постников С. Н. Исследование электрических явлений при трении и резании металлов. Кандидатская диссертация. Горьковский политех. ин-т им. А. А. Жданова, 1969.
26. Постников С. Н. [1], с. 35.
27. Hehenkamp T. — «Archiv für das Eisenhüttenwesen», 29, 4, 1958.
28. Бобровский В. А. [1], с. 7.
29. Постников С. Н., Воробкин Ю. А., Обидин В. А. [2], с. 61.
30. Постников С. Н., Авдонин И. М., Громыко Г. Г., Зинкин Ю. И., Полу-

- ичев А. Н. — В кн.: Трение, смазка, износ. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 29, 9, 29 (1973).
31. Постников С. Н., Годлики А. Ф., Тараканов В. Н. — В кн.: Вопросы электрофизики трения и обработки резанием. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 30, 4, 27 (1974).
32. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М., Физматгиз, 1963.
33. Сталла В. П. Электронная теория адгезии. Кандидатская диссертация. Ин-т физической химии АН СССР, 1961.
34. Дерягин Б. В., Крогова Н. А. Адгезия. М., Изд-во АН СССР, 1949.
35. Мамбетов Д. М. Электрические явления при адгезионном и когезионном разрушении твердых тел. Фрунзе, «Мектеп», 1973.
36. Лаффитц Е. М. — «Докл. АН СССР», 97, 4, 643 (1954).
37. Castmir H. B. C. — «J. chim. phys.», 46, 407 (1949).
38. Дерягин Б. В., Крогова Н. А., Киселева Н. П., Топоров Ю. П. [3], с. 1.
39. Дерягин Б. В. — «ЖФХ», 5, 1165 (1934).
40. Terzaghi K. Erdbebenmechanik. Wien, 1925.
41. Bowden F. P., Tabor D. Friction and Lubrication of Solids, Part II. Oxford, «Clarendon Press», 1964.
42. Tabor D. — «Proc. Roy. Soc.», A251, 378 (1959).
43. Postnikov S. N. — «Contemporary Physics», 6, 2, 100 (1964).
44. Brillouin M. — «Ann. chim. phys.», 16, 456 (1899).
45. Woog P. Contribution a l'etude de graissage. Onctuosité. Influences moléculaires. Paris, 1926.
46. Крайневский Н. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. М., Изд-во АН СССР, 1956.
47. Adirovitch E., Blokhinzev D. — «J. Phys. USSR», 7, 1, 29 (1943).
48. Постников В. С. Внутреннее трение в металлах. М., «Металлургия», 1974.
49. Горелюк Г. С. Колебания и волны. М.—Л., ГИИТЛ, 1950.
50. Шульце Г. Металлофизика. М., «Мир», 1971.
51. Bowden F. P., Freitag E. H. — «Proc. Roy. Soc.», A233, 429 (1958).
52. Семенов В. П., Гурский Л. И. Структура в объеме и на поверхности прокатанных материалов. Минск, «Наука и техника», 1972.
53. Коттель Ч. Элементарная физика твердого тела. М., «Наука», 1965.
54. Брегер А. Х., Жуковичский А. А. — «ЖФХ», 20, 4—5, 355 (1946).
55. Недорезов С. С. — «ЖЭТФ», 51, 3 (9), 868 (1966).
56. Беккер Ф. Электронная теория. ГИИТЛ, 1941.
57. Крок В. И., Павлов В. В. — В кн.: Исследование поверхности конструктивных материалов методом извольэлектронной эмиссии. «Труды Уральского политех. ин-та им. С. М. Кирова» (Свердловск), 177, 116 (1969).
58. Соколов Л. Д., Гуслякова Г. П., Шеталов Д. И., Мясников А. М., Романов П. И., Сидоров В. П., Шибаров В. В. — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 155.
59. Гуслякова Г. П., Сидоров В. П., Соколов Л. Д. — Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической конференции «Современные достижения в науке и практике физики металлов, металловедения и обработки металлов давлением». Краснодар, 1973, с. 25.
60. Физическое металловедение, вып. 1. Под ред. Р. Кана, М., «Мир», 1967.
61. Новиков И. Н. — Изв. высш. учеб. заведений. Физика, 1972, № 7.
62. Муха И. М., Штепан Я. Г., Вальчук Г. И. — «ФХММ», 5, 111 (1971).
63. Степанов В. И. — В кн.: Прочность металлов при циклических нагрузках. М., «Наука», 1970, с. 181.
64. Алябьев А. Я., Швелл В. В., Анпилов В. И. — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 132.
65. Бортник Г. И., Матюшенко В. Я. [3], с. 132.
66. Матюшенко В. Я., Бортник Г. И., Хачин Д. Е., Шпельнов Г. П. [3], с. 157.
67. Демченко В. В., Хонгуров Н. Е. — «Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева», 39, 115 (1962).
68. Лиденцова Т. С., Стародубровская И. Н. — В кн.: Трение, смазка, износ. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 29, 9, 24 (1973).
69. Марков А. А. [2], с. 28.
70. Кичкин Г. И., Марков А. А., Лашки В. Л. [2], с. 37.
71. Марков А. А., Кичкин Г. И., Лашки В. Л. — «Химия и технология топлив и масел», 1970, № 10, с. 44.
72. Гаркунов Д. Н., Марков А. А., Голиков Г. А. — В кн.: Теория смазочного действия и новые материалы. М., «Наука», 1965, с. 12.
73. Гаркунов Д. Н., Красельский Н. В. — «Докл. АН СССР», 113, 2, 326 (1957).
74. Conway V., Bockris S. — «J. Chem. Phys.», 26, 3, 1957.
75. Скориеллетти В. В. Теоретическая электрохимия. Л., Госхимиздат, 1963, с. 568.
76. Балакин В. А., Мельниченко И. М., Подалов А. Н. [3], с. 129.
77. Громико Г. Г., Володин Г. Ф., Постников С. Н., Тюрин Ю. М. — В кн.: Трение, смазка, износ. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 27, 13, 5 (1971).
78. Кубаневский О., Гонимин Б. Описание металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1965.
79. Cabrera N., Mott N. E. — «Reports on progress in physics», 12, 163 (1948).
80. Cabrera N. — «Phil. Mag.», 40, 1, 175 (1949).
81. Давков П. Л., Нематов Д. В., Шишакоев Н. А. Электрографические исследования окисных и гидроксидных пленок на металлах. М., Изд-во АН СССР, 1963.
82. Арсланбеков В. А. — В кн.: Механизм взаимодействия металлов с газами. М., «Наука», 1964, с. 24.
83. Андреев Л. А., Палико Я. — «Докл. АН СССР», 152, 5, 1086 (1963).
84. Jaeschke V., Wagner V. — «Vacuum», 13, 3, 509 (1963).
85. Volker H. — «Phys. Rev.», 138, 6A, 1689 (1955).
86. In: «Acta phys. Austr.», 10, 1957.
87. Крайер И. — В кн.: Эквольэлектронная эмиссия. М., ИЛ, 1962, с. 91.
88. Haxel O., Heutermann P., Seeger K. — «Z. Phys.», 130, 1, 109 (1951).
89. Ройх Н. Л., Ярноуэцкий Л. Я. — «Успехи химии», 28, 2, 168 (1959).
90. Биченин В. В., Климберг Х. Ф. — В кн.: Эквольэлектронные процессы в щелочно-галогенидных кристаллах. «Труды Ин-та физики и астрономии АН СССР» (Тарту), 38, 3 (1970).
91. Grunberg L., Wright K.H.R. — «Proc. Roy. Soc.», 232, 2, 403 (1955).
92. Voss W. D. von, Brozen F. R. — «J. Appl. Phys.», 30, 11, 1639 (1959).
93. Миц Р. И. — В кн.: Исследование поверхности конструктивных материалов методом извольэлектронной эмиссии. «Труды Уральского политех. ин-та им. С. М. Кирова», 177, 5 (1969).
94. Кортов В. С. Там же, с. 18.
95. Евдокимов В. Д. — «Докл. АН СССР», 180, 2, 338 (1968).
96. Гапрондзишвили А. И., Егояев В. Ф. — В кн.: Исследование поверхности конструктивных материалов методом извольэлектронной эмиссии. «Труды Уральского политех. ин-та им. С. М. Кирова», 177, 33 (1969).
97. Вейсс Р. Физика твердого тела. М., «Атомиздат», 1968.
98. Бюрен Ван. Дефекты в кристаллах. М., ИЛ, 1962.
99. Трефилов В. И. Исследование механизма деформации и разрушения переходных металлов с ОЦК-решеткой. Автореферат докторской диссертации. Харьков, 1965.
100. Новиков И. И., Шишакоев Д. П. — «Докл. АН СССР», 164, 2, 307 (1965).
101. Крок В. И. — В кн.: Исследование поверхности конструктивных материалов методом извольэлектронной эмиссии. «Труды Уральского политех. ин-та им. С. М. Кирова», 177, 131 (1969).
102. Самсонов Г. В., Паперно Ю. Б., Фоменко В. С. — «ЖТФ», 36, 8, 1436 (1966).

103. Миц Р. Н., Кортон В. С. — В кн.: Атомная и молекулярная физика. «Труды Уральского политех. ин-та им. С. М. Кирова», 143, 15 (1965).
104. Евдокимов В. Д. — «Докл. АН СССР», 173, 3, 563 (1967).
105. Евдокимов В. Д. — В кн.: Исследование поверхности конструкционных материалов методом экзотермической эмиссии. «Труды Уральского политех. ин-та им. С. М. Кирова», 177, 46 (1969).
106. Евдокимов В. Д. [3], с. 96.
107. Дубинин А. Д. Энергетика трения и износа деталей машин. М.—К., Машина, 1963.
108. Постников С. Н. Исследование электрических явлений при трении и резании металлов. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1967 (Гос. научн.-иссл. ин-т машиностроения).
109. Бобровский В. А. Электродиффузионный износ инструмента. М., «Машиностроение», 1970.
110. Ноффе А. Ф. Полупроводниковые термоконтакты. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1960.
111. Постников С. Н. — «ФХММ», 3, 313 (1967).
112. Лебедев Л. А. [2], с. 21.
113. Френкель Я. И. — «ЖЭТФ», 16, 4, 1946.
114. Девиас Р. М. Воды напряжений в твердых телах. М., ИЛ, 1961.
115. Wettrich G. — «Phys. Rev.», 107, 317 (1957).
116. Костецкий Б. Н., Запорожец В. В. — В кн.: Теория трения и износа. М., «Наука», 1965, с. 125.
117. Хольм Р. Электрические контакты. М., ИЛ, 1961.
118. Wilson R. W. — «Proc. Phys. Soc.», B88, 625 (1955).
119. Bowden F. P., Tabor D. — «Proc. Roy. Soc.», A169, 391 (1939).
120. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Т. IV. Томск, 1947.
121. Крагельский И. В. Трение и износ. М., Машина, 1962.
122. Кабдировский Н. Л., Хайкин С. Э. — «ЖТФ», 3, 1, 91 (1933).
123. Толстой Д. М., Каплан Р. Л. — В кн.: Теория трения и износа. М., «Наука», 1965, с. 44.
124. Ноффе А. Ф. Физика полупроводников. М., Изд-во АН СССР, 1957.
125. Bowden F. P., Williamson J. V. P. — «Research Correspondence», 1954, No. 7, p. A1.
126. Bowden F. P., Williamson J. V. P. — «Proc. Roy. Soc.», A246, 1 (1958).
127. Постников С. Н., Яшина А. Н. — «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 24, 4, 108 (1968).
128. Термоэлектрические материалы и преобразователи. М., «Мир», 1964.
129. Бойден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка. М., Машина, 1960.
130. Якушин Г. И., Мирбабаев В. А. — «Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение», 1962, № 6, с. 84.
131. Ахер Н. — In: Aufwand, Leistung und Wirtschaftlichkeit neuerzeitlicher Werkzeugmaschinen. VI Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium, Essen 1953.
132. Постников С. Н. — «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 24, 3, 156 (1968).
133. Вакрадзе И. И., Виноградов Г. В., Иванов М. К., Корепова Н. В., Подольский Ю. Я. [2], с. 25.
134. Вакрадзе И. И., Иванов М. К., Колесниченко Л. Ф., Юга А. И. [3], с. 4.
135. Пфафель Б. — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 38.
136. Галей М. Т. — В кн.: Основные направления и перспективы развития технологии приборостроения. М., ОНТИПРИБОР, 1964, с. 421.
137. Bowden F. P., Rithler K. E. W. — «Proc. Roy. Soc.», A154, 640 (1936).
138. Шамшур А. С. — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 85.
139. Shaw M. C., Yang C. T. — «Tool Engr.», 36, 4, 1956.
140. Латышев В. И. — «Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение», 1964, № 5, с. 173.
141. Портер А. Н., Преис Г. А., Сологуб Н. А. — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 63.
142. Bowden F. P., Young L. — «Research», 1950, № 3, p. 235.
143. Фрумкин А. И., Басогый В. С., Иофа З. А., Кабанов В. И. Кинетика электродных процессов. М., Изд-во МГУ, 1952.
144. Тюрин Ю. М., Володин Г. Ф. — «Электрохимия», 6, 1186 (1970); 7, 233 (1971).
145. Тюрин Ю. М., Володин Г. Ф. — «Электрохимия», 5, 1203 (1969).
146. Афонькин Г. Н., Володин Г. Ф., Тюрин Ю. М. — «Электрохимия», 7, 1338 (1971).
147. Fleischman M., Mansfeld J., Wulpe-Jones. — «J. Electroanal. Chem.», 10, 511 (1965).
148. Володин Г. Ф., Тюрин Ю. М. — В кн.: Двойной слой и адсорбция на твердых электродах. Т. II. Тарту, Изд. ТГУ, 1970, с. 124.
149. Baley T., Spalek O. — «CITCE», Extended abstracts, 21 Meeting Praha, 1970, p. 114.
150. Портер А. Н., Преис Г. А., Сологуб Н. А. [3], с. 118.
151. Преис Г. А., Сологуб Н. А., Портер А. И. — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 117.
152. Кузнецов В. А., Коробов Ю. М., Котлов Ю. Г., Преис Г. А., Мойсеенко А. А., Новицкий А. Е. [3], с. 19.
153. Коробов Ю. М., Кузнецов В. А., Преис Г. А., Котлов Ю. Г., Новицкий А. Е., Мойсеенко А. А. [3], с. 64.
154. Мойсеенко А. А. [3], с. 112.
155. Гаркунов Д. Н., Крагельский И. В. Эффект избирательного переноса при трении (эффект безызносности). Дина, 41. — «Бюллетень изобр.», 1965, № 17, с. 5.
156. Гаркунов Д. Н., Крагельский И. В., Поляков А. А. Избирательный перенос в узлах трения. М., «Транспорт», 1969.
157. Поляков А. А. [3], с. 122.
158. Постников С. Н., Яшина А. Н. — В кн.: Трение, смазка, износ. «Труды Горьковского политех. ин-та им. А. А. Жданова», 24, 11, 33 (1968).
159. Шпелевас Г. П., Подвалов А. Н. — В кн.: Избирательный перенос в узлах трения. М., Изд. МДНТИ им. Ф. Э. Дзержинского, 1971, с. 44.
160. Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М., Изд-во АН СССР, 1962.
161. Дьяченко П. Е., Толкачева Н. Н., Андреев Г. А., Карпова Т. М. Площадь фактического контакта сопряженных поверхностей. М., Изд-во АН СССР, 1963.
162. Демкин Н. Б. — В кн.: Теория трения и износа. М., «Наука», 1965, с. 26.
163. Демкин Н. Б., Ланков А. А. — «Заводская лаборатория», 1965, № 6.
164. Китакура С. — «Дзюмо гаккай дзюссю», 86, 6, 1022 (1966).
165. Коришников Л. Г., Миц Р. Н. — «Физика и химия обраб. матер.», 1971, № 2, с. 86.
166. Поляков А. А. — «Докл. АН СССР», 205, 2, 332 (1972).
167. Евдокимов В. Д., Добрынский Г. К., Демб С. С. [3], с. 139.
168. Ляшченко А. Б., Снитковский М. М. [3], с. 157.
169. Шилановский В. Г., Харин Е. В., Афанасьев В. А. [3], с. 183.
170. Мельниченко И. М. [3], с. 159.
171. Onsager R. — «Amer. Chem. Soc.», 88, 1486 (1936).
172. Ахиагов А. С. — «Труды III Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах». Т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 119.
173. Bowden F. P., Tabor D. Fretting and Lubrication of Solids, Part I. Oxford, Clarendon Press, 1954.
174. Матвеевский Р. М. Температурный метод оценки предельной смазочной способности машинных масел. М., Изд-во АН СССР, 1956.

170. *Мазневский Р. М., Марков А. А., Буяновский Н. А.* — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 46.

176. *Лайхи В. Л., Виллер А. Б., Санин П. И., Марков А. А., Шенелева Е. С., Лозовой Ю. А., Ермолов Ф. Н.* [3], с. 27.

177. *Шор Г. И., Лапин В. П.* [1], с. 108.

178. *Шор Г. И., Лапин В. П., Евстигнев Е. В.* [2], с. 41.

179. *Лапин В. П., Шор Г. И.* [3], с. 24.

180. *Salomon T.* — «J. Inst. Petrol.», **45**, 423 (1959).

181. *Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. Н.* — В кн.: Электронная обработка металлов. «Труды Центральной научно-иссл. лаборатории электронной обработки материалов АН СССР», вып. 1. М., 1957, с. 9.

182. *Райко М. В., Павлов В. П.* [3], с. 30.

183. *Венцель С. В., Лобкин А. М., Шербатов А. И.* [3], с. 10.

184. *Дейнега Ю. Ф., Думанский А. В., Виноградов Г. В.* — «Коллоидн. журн.», **23**, 1, 25 (1961).

185. *Дейнега Ю. Ф., Виноградов Г. В.* — «Коллоидн. журн.», **25**, 3, 379 (1963).

186. *Венцель С. В., Гарбуз В. Т., Емич Б. Г., Цыганок А. А.* [3], с. 87.

187. *Vieweg V., Kluge J.* — «Arch. Eisenhüttenwesen», **2**, 805 (1929).

188. *Frumkin A.* — «Z. phys. Chem.», **109**, 34 (1924).

189. *Siuot M. I.* — «Ann. Physique», **2**, 505 (1924).

190. *Дерягин Б. В., Страховский Г. М., Малышева Д. С.* — «ЖЭТФ», **16**, 171 (1946).

191. *Дерягин Б. В., Пичушкин Е. Ф.* — «Труды II Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах». М.—Л., Изд-во АН СССР, т. 1, 1947, с. 103; т. 3, 1949, с. 101.

192. *Дерягин Б. В., Пичушкин Е. Ф.* — «Докл. АН СССР», **63**, 53 (1948).

193. *Снитковский М. М.* [3], с. 32.

194. *Дерягин Б. В., Снитковский М. М., Ленка В. Д.* [3], с. 188.

195. *Снитковский М. М.* — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 68.

196. *Юрве В. Н.* [3], с. 41.

197. *Мигаль В. Д., Павлов В. П.* — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 92.

198. *Hardy W.* — «Phil. Mag.», **40**, 201 (1920).

199. *Духовской Е. А., Овощенко В. С., Поломарев А. Н., Сидин А. А., Галаров В. Л.* — «Докл. АН СССР», **189**, 6, 1211 (1969).

200. *Litt B.* — «VDI-Berichte», **20**, 1957.

201. *Ханжамедов С. А., Поповский Ю. М., Килицкий И. М.* [3], с. 35.

202. *Гейда М., Вахаль А.* — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 65.

203. *Hardy W.* — «J. Chem. Soc.», **127**, 1207 (1925).

204. *Zisman W.* — In: Friction and Wear, Edited by R. Davies. Amsterdam, Elsevier Comp., 1959, p. 110.

205. *Фурк Г. Н.* — В кн.: Исследования в области поверхностных сил. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 98.

206. *Fein R. S., Rowe C. N., Kreuz K. L.* — «Trans. ASLE», **2**, 50 (1959).

207. *Bowden F. P., Gregory I. N., Tabor D.* — «Nature», **156**, 97 (1945).

208. *Pierre L. E. St., Owens R. S., Klint R. V.* — «Nature», **202**, 1204 (1964).

209. *Fein R. S., Kreuz K. L.* — «Trans. ASLE», **8**, 29 (1965).

210. *Chafkin S. W.* — «Wear», **10**, 49 (1967).

211. *Tabor D.* — «Conf. on Lubrication and Wear», P. 16. London, 1967, p. 3.

212. *Москален В. Н.* [3], с. 161.

213. *Аваков А. А.* Физические основы теории стойкости режущих инструментов. М., Машино, 1960.

214. *Даниелян А. М., Бобровский В. А.* — «Труды военной академии БТВ», **1952**, № 11—12.

215. *Семко М. Ф.* Теплота резания и стойкость инструмента. Л., 1937, в кн.: Материалы к конференции по резанию металлов, ЛОНИТОМАШ, 1940.

216. *Яковлев Г. М.* Некоторые вопросы скоростного фрезерования и точности. Минск, Госиздат, 1960.

217. *Кривец Д. В., Рыжкин А. А., Дмитриев В. С.* [3], с. 67.

218. *Дмитриев В. С., Рыжкин А. А., Кривец Д. В.* [3], с. 57.

219. *Бобровский В. А., Соловьев Ю. А.* [1], с. 97.

220. *Афанасьев Ф. Э., Бобровский В. А.* [2], с. 54.

221. *Писарев В. С.* Термоэлектрические токи при сверлении и стойкость специальных сверл малого диаметра. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1969 (Московский авиационный технол. ин-т).

222. *Бобровский В. А.* — «Вестник машиностроения», **1966**, № 8, с. 65.

223. *Vargov G., Sprener R. M.* — «Ann. CIRP», **18**, 2, 199 (1970).

224. *Марксем Р. Г.* — «Сборник научных трудов Ленинградского филиала Ереванского политехн. ин-та им. К. Маркса», **1**, 4, 57 (1971); [3], с. 73.

225. *Куликовский Л. Ф., Мелик-Шахназаров А. М., Рабинович С. Г., Селибер Б. А.* Гальванометрические компенсаторы. М.—Л., «Энергия», 1964.

226. *Марксем Р. Г.* Исследование явления термоэлектрических в термомагнитных явлений на стойкости резцов. Автореферат кандидатской диссертации. Тбилиси, 1973 (Грузинский политехн. ин-т им. В. И. Ленина).

227. *Дубров Ю. С., Николаева Г. С., Филоменко В. С.* [2], с. 70.

228. *Якуник Г. И., Умаров Э. А., Абузов Ф. Я.* [2], с. 132.

229. *Хидеки Косахара, Наохару Кюсита.* — «Рингаку кюкаосэ кокаку», **37**, 3, 177 (1961).

230. *Бобровский В. А., Писарев В. С.* [1], с. 83.

231. *Бобровский В. А., Писарев В. С.* — Тезисы докладов научно-технического семинара «Новые режущие инструменты и прогрессивные процессы резания». Харьков, 1968, с. 42.

232. *Постников С. П., Бородкин Ю. А., Воловская Н. Д., Обидин В. А.* — В кн.: Трение, смазка, износ. «Труды Горьковского политехн. ин-та им. А. А. Жданова», **24**, 11, 44 (1968).

233. *Анджос П. А.* Исследование и выбор быстрорежущей стали в термической обработке сверл. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1972 (Московский станкостроительный ин-т).

234. *Постников С. П., Бородкин Ю. А., Обидин В. А.* Информационный листок Волго-Вятского ЦНТИ, **1969**, № 170.

235. *Постников С. П., Полуинцев А. И.* — В кн.: Электрические явления при резании и трении металлов. Изд. Ленинградского филиала Ереванского политехн. ин-та им. К. Маркса, **1970**, с. 121.

236. *Марксем Р. Г.* — «Сборник научных трудов Ленинградского филиала Ереванского политехн. ин-та им. К. Маркса», **1**, 4, 417 (1971).

237. *Степаненко А. В.* [2], с. 102.

238. *Шульга В. А.* [2], с. 85.

239. *Шульга В. А.* [3], с. 81.

240. *Лоланде Т. Н.* Износ режущего инструмента. М., Машино, 1958.

241. *Якуник Г. И., Якубов Ф. Я.* — «Труды Ташкентского политехн. ин-та им. А. Р. Бирунши», **40**, 13 (1966).

242. *Рыжкин А. А., Дмитриев В. С.* [2], с. 116.

243. *Коробов Ю. М.* Исследование процесса чистового точения и сопровождающих его термоэлектрических явлений. Автореферат кандидатской диссертации. Л., 1965 (Ленинградский политехн. ин-т им. М. И. Калинина).

244. *Коробов Ю. М.* [2], с. 108.

245. *Landberg P., Blankvoort P.* — «Metal working», **20**, 16, 1954.

246. *Engstrand G.* — «Trans. of the Royal Inst. of Technology», **144**, Stockholm, 1959.

247. *Engstrand G.* — «Engrs' Digest», **20**, 12, 1959.

248. *Исбаева А., Кашуки А.* — «Кисе дайгаку когаку сьюхо», **1970**, № 42.

249. *Федоров Р.* — «Наука и жизнь», **1962**, № 6, с. 68.

250. Егоров С. В., Руднев А. В. — «Станки и инструмент», 1963, № 5, с. 27.
251. Левин В. И. — Тезисы докладов научно-технического семинара «Новые режущие инструменты и прогрессивные процессы резания». Харьков, 1968, с. 32.
252. Дубров Ю. С., Николаев Г. С., Тар-Миноски С. М. — «Станки и инструмент», 1968, № 8, с. 28.
253. Бобровский В. А. — «Станки и инструмент», 1966, № 12, с. 20.
254. Гуляев А. П. Металловедение. М., «Металлургия», 1966.
255. Коробов Ю. М. — «Станки и инструмент», 1968, № 3, с. 25.
256. Андреевский В. М. Исследование сил трения и износа стальных пар при вибрации. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1968 (Московский станкостроительный ин-т).
257. Дикшин В. И. [1], с. 6.
258. Креггин О. В. — Тезисы докладов научно-технической конференции по обработке металлов резанием. Горький, 1970, с. 56.
259. Dwyer J. J. — «Amer. Machinist», 198, 6, 105 (1964).
260. Лихтман В. И., Ребиндер П. А., Корнеев Г. В. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов. М., Изд-во АН СССР, 1954.
261. Елифенов Г. И., Плетьва Н. А., Ребиндер П. А. — «Докл. АН СССР», 97, 2, 277 (1954).
262. Ребиндер П. А. — «Изв. АН СССР. Отд. хим. наук», 11, 1284 (1957).
263. Cassin C., Boothroyd G. — «J. Mech. Eng. Sci.», 7, 1, 67 (1965).
264. Macklin E. S., Janke W. R. — «J. Appl. Phys.», 25, 5, 1954.
265. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М., Машиностроение, 1956.
266. Arzt P. R., Stewart I. J. — «Lubrication Eng.», 19, 7, 1963.
267. Дерягин Б. В., Обухов Е. В. — «Коллоидн. журн.», 1, 365 (1935).
268. Дерягин Б. В. — «Коллоидн. журн.», 17, 3, 267 (1955).
269. Исеев А. И. Процесс образования поверхностного слоя при резании металлов. М., Машиностроение, 1950.
270. Тимофеев В. П. Смазочно-охлаждающие жидкости. М., Машиностроение, 1960.
271. Бибиков Е. С., Турки В. Ф. — «Природа», 1966, № 12, с. 59.
272. Филиппов В. С., Дубров Ю. С. [2], с. 81.
273. Лабзина Е. П., Николаева Г. С., Дубров Ю. С. [2], с. 95.
274. Макаров А. Д., Колеченко В. М. — В кн.: Электрические явления при резании и трении металлов. Изд. Ленинградского филиала Ереванского политех. ин-та им. К. Маркса, 1970, с. 107.
275. Бобровский В. А. — Тезисы докладов научно-технического семинара «Новые режущие инструменты и прогрессивные процессы резания». Харьков, 1968, с. 23.
276. Рыжкин А. А. Исследование процесса сперления жаропрочных сталей быстрорежущими и твердосплавными сверлами малого диаметра. Автореферат кандидатской диссертации. Ростов-на-Дону, 1966.
277. Рыжкин А. А., Дзирин В. С., Кривец Д. В., Бишев Р. Э. [3], с. 78.
278. Чертаевских А. К., Кан К. П. — «ЖТФ», 14, 9, 1944.
279. Костыцкий Б. И., Топека П. К., Нестеровский С. Е. — В кн.: Передача технологии машиностроения. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 461.
280. Furuchi R., Tamamura K. — «Memoirs of the Faculty of Engineering» (Osaka City University), 2, 1960.
281. Очистление металлов. Под ред. Ж. Бенара. Т. 1. М., «Металлургия», 1968.
282. Жилин В. А. [3], с. 62.
283. Германчук Ф. К., Пятницкий И. Е., Докучаев В. Г. — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 79.
284. Францевич И. Н., Калинин Д. Ф. — «Вопросы порошковой металлургии и прочности материалов», 1956, № 3, с. 45.
285. Ковенский И. И. — «ФТТ», 5, 5, 1423 (1963).
286. Лебедев Т., Гутерман В. Коррозия, защита от коррозии и электролиз. ГНТИ, 1948.
287. Калинин Д. Ф., Ковенский И. И., Смолин М. Д., Францевич И. Н. — «ФММ», 10, 1, 42 (1960).
288. Францевич И. Н., Калинин Д. Ф., Ковенский И. И., Смолин М. Д. — «ФТТ», 5, 5, 1238 (1963).
289. Калинин Д. Ф., Ковенский И. И., Смолин М. Д., Францевич И. Н. — «Изв. АН СССР. ОТН, Металлургия и топливо», 1956, № 1, с. 71.
290. Галей М. Т. — «Приборостроение», 1962, № 10, с. 15.
291. Галей М. Т. [1], с. 27.
292. Шульга В. А. Исследование стойкости зубчатых инструментов и шероховатости рабочих поверхностей зубьев колес в зависимости от термоэлектрических явлений. Автореферат кандидатской диссертации. Куйбышев, 1970 (Куйбышевский политех. ин-т им. В. В. Куйбышева).
293. Тощев В. С. [2], с. 48; [3], с. 206.
294. Budzynski A. F. — «Mechanik», 1971, № 7.
295. Ладкина Е. П., Гудан Р. М. [3], с. 69.
296. Усманов К. Б., Якушкин Г. И. — «Изв. АН УССР. Серия техн. наук», 1968, № 5.
297. Хашиялов А. Н., Якушкин Г. И. [2], с. 137.
298. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М., «Машиностроение», 1966.
299. Якушкин Г. И., Якубов Ф. Я., Умаров Э. А. — В кн.: Износ и антифрикционные свойства материалов. М., «Наука», 1968, с. 91.
300. Балабеков М. Т., Черноглазов М. И., Усманов А. И., Башкиев С. В. — «Сборник материалов по итогам НИР механического факультета Ташкентского политех. ин-та им. А. Р. Бируни», вып. 83. Ташкент, 1972, с. 4.
301. Семенов А. П. Схватывание металлов. М., Машиностроение, 1958.
302. Семенов А. П. — В кн.: Теория трения и износа. М., «Наука», 1965, с. 164.
303. Семенов А. П. — В кн.: О природе схватывания твердых тел. М., «Наука», 1968, с. 44.
304. Семенов А. П. — В кн.: О природе трения твердых тел. Минск, «Наука и техника», 1971, с. 109.
305. Семенов А. П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах. М., «Наука», 1972.
306. Слат М. К. Основы физики металлов. М., Metallurgizdat, 1962.
307. Лихтман В. И. — В кн.: О природе схватывания твердых тел. М., «Наука», 1968, с. 30.
308. Айбиндер С. Б. Холодная сварка металлов. Рига, Изд-во АН Латв. ССР, 1957.
309. Журков С. И. — «Вестник АН СССР», 1968, № 3, с. 46.
310. Ресаль В. Р., Слущер А. И., Толмачевский Э. Е. — «УФН», 106, 2, 193 (1972).
311. Инденбом В. Л., Орлов А. И. — В кн.: Термические активированные процессы в кристаллах (вступительная статья). «Новости физики твердого тела», вып. 2. М., «Мир», 1973.
312. Ларин М. И., Мартынов Г. А. — Тезисы докладов научно-технического семинара «Новые режущие инструменты и прогрессивные процессы резания». Харьков, 1968, с. 8.
313. Курочкина Л. Ф., Колево Н. С. [3], с. 110.
314. Айбиндер С. Б. — В кн.: О природе схватывания твердых тел. М., «Наука», 1968, с. 35.
315. Матусеев С. И. Влияние механических, физических и химических свойств металлов на их обрабатываемость резанием. Автореферат кандидатской диссертации. Горький, 1971 (Горьковский политех. ин-т им. А. А. Жданова).
316. Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Краулин Ю. Л. — «Изв. АН СССР. Неорганическая химия», 1, 1, 29 (1965).
317. Лондау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М., «Наука», 1964.
318. Рабенберг Ю. А. Влияние смазочных масел на долговечность и надежность деталей машин. М., «Машиностроение», 1970.

319. *Левин В. И., Никитин С. В.* [3], с. 72.
320. *Григорьев И. А.* [3], с. 126.
321. *Гегель В. Р.* — В кн.: Некоторые вопросы физики пластичности кристаллов. «Итоги науки», вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 12.
322. *Лозовский В. И.* — В кн.: О природе схватывания твердых тел. М., «Наука», 1968, с. 33.
323. *Давидьян А. М.* — «Вестник машиностроения», 1957, № 1, с. 39.
324. *Постников С. И.* — В кн.: Трение, смазка, износ. «Труды Горьковского политеха. ин-та им. А. А. Жданова», 29, 9, 39 (1973).
325. *Резников И. И.* Учение о резании металлов. М., Машгиз, 1947.
326. *Reichenbach G. S.* — «Trans. ASME», 80, 3, 1958.
327. *Резников А. И.* Теплообмен при резании и охлаждение инструментов. М., Машгиз, 1963.
328. *Телегин А. А.* Исследование теплового состояния токарного реза. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1968 (Московский авиационный техн. ин-т).
329. *Резников А. И.* Теплофизика резания. М., «Машиностроение», 1969.
330. *Костецкий В. И.* — «Заводская лаборатория», 1946, № 11—12.
331. *Ташлицкий Н. И.* О влиянии теплопроводности стали на температуру реза и обрабатываемость. М., Машгиз, 1948.
332. *Ташлицкий Н. И.* Влияние механических свойств и теплопроводности сталей на их обрабатываемость. М., Машгиз, 1952, с. 56.
333. *Калаков И. Ф.* Диффузионная сварка в вакууме. М., «Машиностроение», 1968.
334. *Постников С. И., Громыко Г. Г., Зинкин Ю. И., Полуничко А. И.* [3], с. 75.
335. *Дроздов Н. Г.* Статическое электричество в промышленности. Госэнергоиздат, 1949.
336. *Лев Л.* Статическая электризация. М.—Л., ГЭИ, 1963.
337. *Зелотых В. И.* — В кн.: Электронская обработка металлов. «Труды Центральной научно-иссл. лаборатории электронской обработки материалов АН СССР», вып. 1. М., 1967, с. 38.
338. *Зингерман А. С.* — «Изв. высш. учеб. заведений. Физика», 1963, № 1, с. 20.
339. *Визюлин И. И., Мизер А. А., Молодецкая К. В.* [3], с. 13.
340. *Евдокимов Ю. А., Санчес С. С.* [3], с. 147.
341. *Арбит С. Э., Громыко Г. Г., Постников С. И., Штейнберг М. И., Иванов А. А., Лихачев Ю. И.* — «Электронная техника. Серия 7 «Технология, организация производства и оборудование», 4 (56), 65 (1973).
342. *Голышева Г. И., Громыко Г. Г., Арбит С. Э., Штейнберг М. И., Постников С. И.* — В кн.: Трение, смазка, износ. «Труды Горьковского политеха. ин-та им. А. А. Жданова», 29, 2, 4 (1973).
343. *Harper W. R.* — «Adv. Phys.», 6, 365 (1967).
344. *Корифельд М. И.* — «ФТТ», 11, 1611 (1969).
345. *Корифельд М. И.* — «ФТТ», 10, 2422 (1968).
346. *Корифельд М. И.* — «ФТТ», 13, 474 (1971).
347. *Seehn A., Lotz A.* — «Z. Phys.», 8, 242 (1921).
348. *Guytes D. K.* — «Brit. J. Appl. Phys.», 2, 11, 1533 (1969).
349. *Boning P.* — «Z. angew. Phys.», 8, 516 (1956).
350. *Грасси П.* Химия процессов деструкции полимеров. М., ИЛ, 1969.
351. *Бухалин П. Ю., Дубинская А. М., Радциг В. А.* — «Успехи химии», 38, 503 (1969).
352. *Баралбойл И. К.* Механохимия высокомолекулярных соединений. М., «Наука», 1971.
353. *Виноградов Г. В.* Докл. «Смазочные действия углеводородных синтетических жидкостей и твердых полимеров». Изд. Ин-та нефтехимического синтеза АН СССР, 1962, с. 9.
354. *Биллик Ш. М., Цуркан В. П.* — В кн.: Теория смазочного действия и новые материалы. М., «Наука», 1965, с. 222.
355. *Георгиевский Г. А., Лебедев Л. А., Бороздинский Е. М.* [2], с. 12.
356. *Харитонов В. В., Шпильков Г. П., Матюшенко В. Я.* [3], с. 208.
357. *Георгиевский Г. А., Лебедев Л. А.* [3], с. 15.
358. *Поляков А. А., Гаркунов Д. И.* — Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия». Киев, 1973, с. 11.
359. *Гаркунов Д. И., Матюшенко В. Я., Харитонов В. В., Шпильков Г. П.* [3], с. 88.
360. *Георгиевский Г. А., Лебедев Л. А., Матюшенко В. Я., Поляков А. А.* [3], с. 138.
361. *Лысов Е. И.* Исследование электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования, и пути их использования. Автореферат кандидатской диссертации. Челябинск, 1972 (Челябинский политех. ин-т им. Ленинского комсомола).
362. *Якунин Г. И., Молчанова Н. Г.* [2], с. 128.
363. *Хашимов А. И.* Влияние переднего угла режущего инструмента на его стойкость при применении СОЖ, намагничивания и пропускания термонов через зону резания. Автореферат кандидатской диссертации. Ташкент, 1969 (Ташкентский политех. ин-т им. А. Р. Буруни).
364. *Галей М. Т.* — «Станки и инструменты», 1973, № 5, с. 31.
365. *Димитров Л. П.* — «Сб. от доклады на ВИНМЕСС — Русе», 13, 2, 62 (1971).
366. *Ryder H., Jones R.* — «Phys. Rev.», 1, 1913.
367. *Herbert E. G.* — «J. Iron and Steel Inst.», 120, 2, 1929.
368. *Бернштейн М. Л.* Термомангнитная обработка стали. М., «Металлургия», 1968.
369. *Ланда В. А.* — В кн.: Физические методы исследования и контроля структуры инструментальных сталей. М., Машгиз, 1963.
370. *Якунин Г. И., Балабеков М. Т.* — «Янги техника», Ташкент, 1965, № 4.
371. *Лавкин А. А., Марковский Р. Г.* — «Сборник научных трудов Ленинградского филиала Ереванского политеха. ин-та им. К. Маркса», 1, 4, 119 (1971).
372. *Гаврилов Г. М., Сиданенко В. И., Будяк В. М., Ионичев А. И.* — В кн.: Теплофизика технологических процессов. Изд. Саратовского гос. ун-та, 1973, с. 135.
373. *Архангельская Г. А., Дикань А. И., Доброхотова В. Б.* — В кн.: Вопросы электрофизики трения и обработки резанием. «Труды Горьковского политеха. ин-та им. А. А. Жданова», 30, 4, 40 (1974).
374. *Галей М. Т.* [2], с. 125.
375. *Сидовский В. Д., Смирнов Л. В., Фокина Е. А., Малочен П. А., Соколов И. П.* — «ФММ», 24, 5, 918 (1967).
376. *Бородкин Ю. А., Курбатов В. А., Силуанов А. Е., Ткачук В. И.* — В кн.: Вопросы электрофизики трения и обработки резанием. «Труды Горьковского политеха. ин-та им. А. А. Жданова», 30, 4, 36 (1974).
377. *Постников С. И., Курбатов В. А., Бородкин Ю. А., Овчинников А. Д.* — «Вопросы судостроения. Технологическая и организационная производства судового машиностроения», 3, 92 (1975).
378. *Одиоз Н. А.* — «Изв. АН СССР. Отд. техн. науки», 1948, № 12.
379. *Белов К. П.* Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металах. М.—Л., ГИИЛ, 1951.
380. *Мишин Д. Д.* Влияние дислокационной структуры на восприимчивость и коэрцитивную силу кременнистого железа. Автореферат докторской диссертации. Томск, 1970 (Томский гос. ун-т им. В. В. Кузнецова).
381. *Физическое металловедение*, вып. 2. Под ред. Р. Кана. М., «Мир», 1968.
382. *Горелик С. С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1967.
383. *Аваков А. А.* — «Сборник трудов ТБИИЖТ им. В. И. Ленина», 27—28, 288 (1948).

ПРИЛОЖЕНИЕ I

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА<sup>1</sup>**

Указанный способ предлагается с целью значительного сокращения затрат материалов и времени при лабораторных испытаниях методов и средств, обеспечивающих повышение стойкости режущего инструмента. Определение эффективности этих методов производится, как правило, путем статистической обработки экспериментальных данных. В качестве критерия эффективности  $K_2$  принимается отношение периодов стойкости либо величин износа инструмента, работающего в обычных условиях и в условиях применения того или иного метода повышения его износостойкости. Отбор инструмента по однородности позволяет сузить интервал изменения этого критерия, однако определение его наиболее перелетной величины предполагает сопоставление результатов, полученных на одних и тех же сверлах, развертках, фрезах и т. п. Указанная величина будет тем ближе к действительному значению критерия эффективности, чем больше статистический материал мы располагаем при ее определении. Накопление статистического материала производится путем многократного определения периодов стойкости либо величин износа, когда новые условия обработки резанием чередуются с исходными условиями после каждой из переточек инструмента. Необходимость такого чередования вызвана тем, что после каждой из переточек инструмента его состояние является модифицированным, отличным от предшествующих состояний. Таким образом, из-за плохой воспроизводимости условий обработки резанием число переточек, достаточное для сопоставления усредненных данных, неизбежно становится большим. В этом и состоит основной недостаток известных способов определения  $K_2$ . В предлагаемом варианте отмеченный недостаток устраняется, ибо критерий эффективности методов и средств, применяемых с целью повышения стойкости инструмента, определяется в период работы инструмента до его однократного затупления. Наряду со значительным сокращением затрат материалов и времени этот способ, по-видимому, позволит получить более достоверные функциональные зависимости износа инструмента, так как каждая из них снимается в одних и тех же условиях резания — между двумя соседними переточками.

Реализуется данный способ путем многократного последовательного чередования условий обработки с применением какого-либо метода (средства) воздействия на процесс резания (например, размыкания термoeлектрической цепи *инструмент — деталь — станок*, намагничивания инструмента, электрополирующих склеенных приспособлений, технологических средств смазки и охлаждения и т. д.) с исходными условиями обработки до однократного затупления инструмента. Его суть сводится к определению разностей величин (показаний прибора), отражающих абсолютное изменение износа за одинаковые промежутки времени при каждом из серии последовательных переходов, суммированию таких разностей для двух совокупностей указанных переходов (сначала в одном, а затем в обратном ему направлении) и, наконец, к вычислению критерия эффективности метода как отношения полученных сумм.

Сущность способа поясняет условная диаграмма, показанная на рис. 135.

Предположим, что до однократного затупления инструмента (до переточки сверла) просверлено  $N$  отверстий, причем использование того или иного способа воздействия на процесс резания (например, размыкания термoeлектрической цепи *инструмент — деталь — станок*) чередовалось с исходными условиями обработки (цепь термотока замкнута) при выполнении каждого последующего отверстия. Показания, снятые с прибора и отражающие степень затупления инструмента, оказались при этом следующими:

$$S_1 (зам) \cdot S_2 (раз) \cdot S_3 (зам) \cdot S_4 (раз) \cdot \dots \cdot S_N (зам)$$

Они позволяют найти критерий эффективности метода как отношение сумм разностей показаний прибора при  $(N-1)/2$  переходах по разомкнутой цепи термотока к замкнутой к аналогичной сумме, но полученной для такой же совокупности переходов обратных:

$$K_2 = \frac{\sum \Delta S_{(раз \rightarrow зам)}}{\sum \Delta S_{(зам \rightarrow раз)}}$$

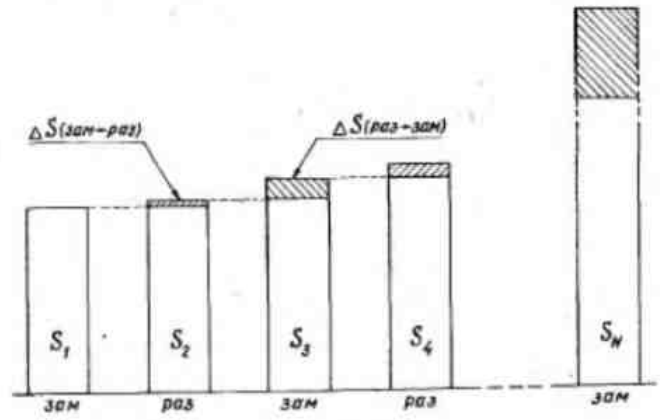


Рис. 135

Пусть, например, мы сравниваем две смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ1 и СОЖ2), причем выяснилось, что при переходах от обработки с применением СОЖ к обработке всухую и наоборот

$$\frac{\sum \Delta S (сож 1 \rightarrow вс)}{\sum \Delta S (вс \rightarrow сож 1)} = \frac{\sum \Delta S (сож 2 \rightarrow вс)}{\sum \Delta S (вс \rightarrow сож 2)}$$

т. е.  $K_{01} = K_{02}$ . Это означает, что с точки зрения влияния на стойкость инструмента выбранные СОЖ равноценны.

Идея экспериментальной оценки критерия эффективности требует, естественно, разработки технических решений, наиболее приемлемых для ее практического осуществления. Способ может быть реализован, например, с помощью устройства, состоящего из двух частей: специального приспособления, показанного на рис. 136, и системы контроля, блок-схема которой приведена на рис. 137.

Приспособление, через которое осуществляется передача крутящего момента от шпинделя станка к инструменту, например сверлу, состоит из двух

<sup>1</sup> Совместно с автором в разработке данного способа принимал участие Ю. И. Зинкин и А. Д. Овчинников.



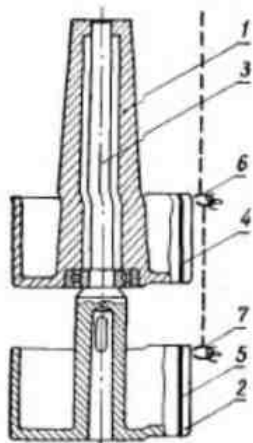


Рис. 136

конических втулок 1 и 2, соединенных упругим валком 3. В процессе резания валок закручивается, благодаря чему происходит поворот нижней втулки относительно верхней на некоторый угол. В результате такого поворота узкие полоски магнитной ленты 4 и 5, наклеенные на фланцы втулок параллельно оси вращения, расходятся, причем по мере износа инструмента расстояние между полосками увеличивается. На шпиндельной бабке станка закреплены магнитные головки 6 и 7, в которых генерируются электрические импульсы в момент прохождения ими участков с иммагнетичной лентой. Электрические сигналы, поступающие с магнитодатчиков Д1 и Д2 (см. блок-схему на рис. 137), усиливаются с помощью усилителей У1 и У2 до значений, необходимых для запуска транзисторного триггера. Такие сигналы поступают на формирователи Ф1 и Ф2, представляющие собой дифференцирующие цепочки с диодным ключом. На выходе формирователей получают дифференцированные импульсы определенной полярности, соответствующие переднему фронту входных сигналов. Эти импульсы поступают на отдельные входы триггера Т. Магнитная головка устанавливается таким образом, чтобы при холостом вращении сверла сигналы с магнитодатчиков Д1 и Д2 приходили одновременно; в этом случае канал связи между генератором импульсов ГИ и счетчиком импульсов СИ будет закрыт ключом К. С началом обработки сигнала, поступающего от магнитодатчиков, окажутся сдвинутыми во времени на некоторый интервал  $\tau$ , в течение которого и будет происходить заполнение счетчика импульсами, вырабатываемыми генератором. Число импульсов, поступающих в счетчик за время одного оборота шпинделя,  $n = \tau / t$ , где  $t$  — период следования импульсов от генератора.

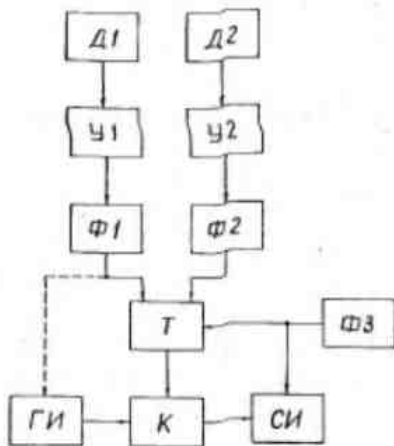


Рис. 137

Временной интервал  $\tau$  и число  $n$  будут соответствовать степени деформации упругого валка, т. е. степени затупления инструмента в пределах данного оборота. Суммарное число импульсов  $S_i (i=1; 2; 3; \dots; N)$ , поступивших в счетчик за время одного прохода инструмента на установленную глубину сверления (одно отверстие), будет зависеть от величины и интенсивности износа инструмента по мере углубления его в деталь. Схема формирования импульсов сброса ФЗ необходима для обнуления показаний счетчика СИ и для приведения триггера Т в исходное состояние перед началом сверления каждого отверстия. Чтобы обеспечить устойчивую работу всего устройства, генератор импульсов работает в режиме внешнего запуска, что на приведенной блок-схеме показано функцией лямбда.

Как видно, описанное устройство позволяет получить совокупность показаний  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ , необходимую для определения критерия эффективности по предложенному способу.

**МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Когда знание о механизме изучаемого процесса является неполным, то поведение функции отклика в заданном  $n$ -факторном пространстве описывается уравнением регрессии. Было бы неправильным считать, что полином  $k$ -го порядка, аппроксимирующий поверхность отклика, лишен всякого эвристического потенциала. Статистическая связь между случайными величинами, если она установлена впервые, может привести на мысль о «теневых» сторонах процесса, оставшихся ранее не замеченными. Однако раскрыть сам характер связи по виду полиномиального уравнения представляется весьма затруднительным (даже при условии ранжирования эффектов). Этому соображением и оправдывается попытка использовать результаты пассивного наблюдения для получения такой адекватной функциональной зависимости, которая отражала бы смысловую связь между случайными величинами в каждой из замеченных ею вероятностных зависимостей.

Пусть в некоторой системе случайных величин  $(X, Y, \dots, W)$  результат опыта задается случайной функцией отклика

$$V(X, Y, Z, \dots, P, Q, W), \quad (1)$$

причем  $n$  переменных факторов, являющихся аргументами этой функции и полагаемых сначала независимыми, расположены в направлении убывания их стохастической связи с  $V$ . Реализацией функции (1), аппроксимирующей ее математическое ожидание, является «почти неслучайная» функция

$$v(x, y, z, \dots, w). \quad (2)$$

Требуется найти аналитическое выражение функции отклика (2), если известны числовые значения случайных величин  $(v_1, x_1, y_1, \dots, w_1)$  при достаточно большом количестве наблюдений  $(i=1; 2; 3; \dots; N)$ .

Обработку опытов начнем с того, что найдем оценку математического ожидания случайной функции  $V(X)$ . Составим таблицу распределения, в которой весь опытный материал разбит по интервалам равной длины. Если при этом окажется, что отдельные наблюдения попадают в интервалы, находящиеся за пределами распределения данного множества, то при вычислении оценок для математических ожиданий соответствующих сечений функции такие наблюдения не учитываются<sup>1</sup>.

В качестве оценки для математического ожидания сечения функции  $V(X)$ , обозначаемой в дальнейшем  $m_x$ , естественно принять среднее арифметическое наблюдаемых значений. Тогда оценка  $m_x$  будет состоятельной, несмещенной и при условии нормального распределения  $V$  — эффективной. Поскольку, однако, мы располагаем лишь ограниченным статистическим материалом, вычисление оценок  $m_x$  при любом фиксированном значении  $x_i$  становится невозможным. Оценки для математических ожиданий величин  $X$  и  $V$  нахлещим поинтервально (рис. 138), считая, что  $m_{x_i}$  и  $m_{v_i}$  равны абсциссам и ординатам центров тяжести точек, попавших в пределы  $i$ -го интервала.

Пользуясь рядом значений  $(m_{x_i}, m_{v_i})$ , строим экспериментальную

зависимость  $\tilde{m}_v(\tilde{m}_x)$ , которую и принимаем за искомую оценку  $\tilde{m}_v(x)$ , как если бы она была построена по значениям  $(x_i, m_{v_i})$  при условии, что  $x_i = \tilde{m}_{x_i}$ . Сглаживаем полученную зависимость по методу наименьших квадратов, при этом функция  $\tilde{m}_v(x)$  аппроксимируется выражением  $f(x)$ . Можно записать

$$\tilde{m}_v = f(x). \quad (3)$$

Используя формулу (3), приводим все числовые значения величины  $V$  к одному и тому же значению величины  $X$ , равному  $x^*$ :

$$v_{(x^*)i} = v_i \frac{f(x^*)}{f(x_i)}. \quad (4)$$

Этим осуществляется переход от функции (1) к «менее случайной» функции

$$V_{(x^*)} = V \frac{f(x^*)}{f(x)}. \quad (5)$$

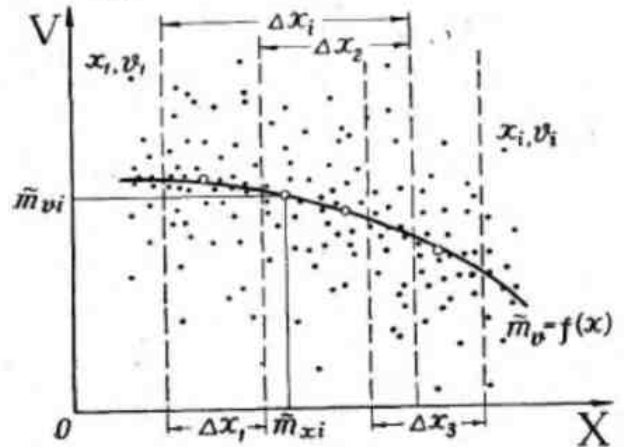


Рис. 138

аргументами которой являются все те же случайные величины, кроме  $X$ :

$$V_{(x^*)}(x^*, Y, Z, \dots, P, Q, W). \quad (6)$$

Совершенно аналогично находим выражение  $\varphi(y)$ , аппроксимирующее математическое ожидание случайной функции  $V_{(y^*)}(Y)$  (точнее, его оценку), и получаем функцию

$$V_{(x^*, y^*)} = V_{(x^*)} \frac{\varphi(y^*)}{\varphi(y)}, \quad (7)$$

к аргументам которой не относятся уже два переменных фактора —  $X$  и  $Y$ :

$$V_{(x^*, y^*)}(x^*, y^*, Z, \dots, P, Q, W). \quad (8)$$

Значение  $y^*$  определяется из условия  $\varphi(y^*) = f(x^*)$ .

<sup>1</sup> Значение  $x^*$  выбирается таким образом, чтобы наибольшее количество экспериментальных точек попало в его окрестность.

Положим же образом выписываем другие переходы в направлении дальнейшего превращения случайной величины  $V$  в величину детерминированную:

$$V(x, y) \rightarrow V(x, y, z) \rightarrow \dots \rightarrow V(x, y, \dots, p) \text{ и т. д.}$$

Итак, преобразование функции отклика, при котором дисперсия этой функции постепенно убывает, можно записать в виде условной схемы:

$$V(X, Y, Z, \dots, P, Q, W) \quad (1)$$

$$V_{(x)}(x^*, Y, Z, \dots, P, Q, W) \quad (2)$$

$$V_{(x, y)}(x^*, y^*, Z, \dots, P, Q, W) \quad (3)$$

$$\dots \dots \dots \quad (4)$$

$$V_{(x, y, \dots, p)}(x^*, y^*, z^*, \dots, p^*, Q, W) \quad (5)$$

$$V_{(x, y, \dots, q)}(x^*, y^*, z^*, \dots, p^*, q^*, W), \quad (6)$$

примем

$$V_{(x, y, \dots, q)} = V_{(x, y, \dots, p)} \frac{\chi(q^*)}{\chi(p^*)} \quad (7)$$

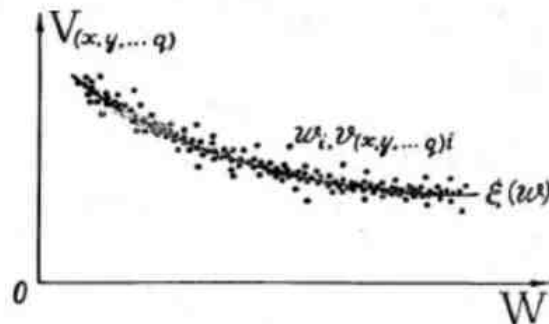


Рис. 139

Единственным аргументом функции (10) является последний из  $n$  выбранных факторов. Основное допущение предлагаемого метода состоит как раз в том, что не математическое ожидание функции  $V_{(x, y, \dots, q)}(W)$ , а именно она сама рассматривается как неслучайная и аппроксимируется выражением  $\xi(W)$ , связывающим полученный выше ряд аналитических выражений:  $f(x), \varphi(y), \dots, \chi(q)$ . Чем больше охвачено факторов, в особенности таких, которые оказывают доминирующее влияние на поведение функции отклика, тем меньше разброс эмпирических точек (рис. 139) и тем точнее формула, приближенно выражающая зависимость между  $V_{(x, y, \dots, q)}$  и  $W$ :

$$V_{(x, y, \dots, q)}(W) \approx \xi(W). \quad (12)$$

Теперь, сделав несколько последовательных подстановок (в обратном порядке), мы можем заменить все частные вероятностные зависимости семейством зависимостей функциональных:

$$\xi(w) \approx V_{(x, y, \dots, p)} \frac{\chi(q^*)}{\chi(p^*)} = \dots = V_{(x, y)} \frac{\phi(x^*) - \gamma(p^*) \chi(q^*)}{\phi(x^*) - \gamma(p^*) \chi(q^*)} = \dots = V \frac{f(x^*) \varphi(y^*) - \gamma(q^*)}{f(x^*) \varphi(y^*) - \gamma(q^*)}. \quad (13)$$

Формула (13) показывает, что «случайность» величины  $V$  практически исчерпана. Обозначив детерминированную величину  $v$  и принимая во внимание, что  $f(x^*) - \varphi(y^*) = \dots = \chi(q^*) = C$ , запишем

$$v \approx C^{1-n} f(x) \varphi(y) \dots \xi(w). \quad (14)$$

Это и есть аналитическое выражение для интересующей нас функции отклика. Кстати, в общем виде аналогичную формулу можно легко получить, пользуясь вероятностной теорией регрессии.

Нетрудно видеть, что в случае применения по формуле

$$v_{(x, y, \dots, w)} = v_{(x, y, \dots, q)} i \frac{\xi(w^*)}{\xi(w)} \quad (15)$$

далеко не все числовые значения величины

$$V_{(x, y, \dots, w)}(x^*, y^*, z^*, \dots, p^*, q^*, w^*) \quad (16)$$

будут в точности совпадать со значением параметра  $C$ , являющегося ее модой:

$$C = v(x^*, y^*, \dots, w^*). \quad (17)$$

Случайные отклонения от  $C$  как от центра рассеивания связаны с влиянием неучтенных факторов. Они могут быть использованы для выявления этих факторов и уточнения выражения (14).

До сих пор переменные  $X, Y, \dots, W$  полагались независимыми, хотя некоторые из них, а в отдельных случаях даже все аргументы функции отклика оказываются попарно коррелированными.

Пусть, например, к таким взаимно связанным величинам относятся факторы  $X, Y$  и  $W$ . Тогда полное преобразование функции представим в виде следующей схемы, которая считается типовой и для других аналогичных вариантов:

$$V(X, Y, Z, \dots, P, Q, W)$$

$$V_{(x)}(x^*, Y, Z, \dots, P, Q, W);$$

$$D[V_{(x)}(Y)] < D[Y(X)];$$

$$D[V_{(x)}(W)] > D[W(X)];$$

$$V_{(x)}(x^*, Y, Z, \dots, P, Q, W_{(x)})$$

$$V_{(x, y)}(x^*, y^*, Z, \dots, P, Q, W_{(x)});$$

$$D[V_{(x, y)}(W_{(x)})] > D[W_{(x)}(Y)];$$

$$V_{(x, y)}(x^*, y^*, Z, \dots, P, Q, W_{(x, y)})$$

$$\dots \dots \dots$$

$$V_{(x, y, \dots, q)}(x^*, y^*, z^*, \dots, p^*, q^*, W_{(x, y)})$$

$$V_{(x, y, \dots, q)}(W_{(x, y)}) \approx \xi(w_{(x, y)})$$

$$v \approx C^{1-n} f(x) \varphi(y) \dots \xi(w_{(x,y)}),$$

где  $D$  — дисперсия случайной функции;

$$C = v(x^0, y^0, \dots, w_{(x,y)}^0).$$

В заключение отметим, что, применяя данный метод, бывает удобнее получить окончательный результат в графо-аналитическом виде, т. е. вместо громоздких полиномов, выражающих сложные экспериментальные зависимости, использовать сами кривые.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	7
<b>Глава I. Некоторые теоретические представления о роли электрических явлений при контакте и трении твердых тел</b>	
§ 1. Электростатическая и электромагнитная компоненты адгезии . . . . .	11
§ 2. Роль электродвиговых сил в процессах трения . . . . .	18
§ 3. О резонансном электромагнитном механизме диссипации энергии при внешнем трении . . . . .	24
§ 4. Элементарная теория трения . . . . .	26
§ 5. Электронный механизм пластифицирования твердых тел при их контактном взаимодействии . . . . .	33
<b>Глава II. Экспериментальные исследования электрических явлений при трении металлов</b>	
§ 1. Работа выхода электрона как критерий физико-химической активности трущихся поверхностей . . . . .	38
§ 2. Эмиссия электронов . . . . .	51
§ 3. Основные источники э. д. с. и эквивалентные электрические схемы трения . . . . .	64
§ 4. Электрическая проводимость контакта . . . . .	74
§ 5. Особенности термоэлектрических явлений при трении . . . . .	90
§ 6. Роль электрохимических процессов . . . . .	98
§ 7. Электрические явления при трении в режиме шибрательного переноса . . . . .	106
<b>Глава III. Электрические свойства и несущая способность граничных смазочных слоев</b>	
§ 1. Введение . . . . .	120
§ 2. Электрические свойства граничных слоев, образованных цепными молекулами . . . . .	127
§ 3. Влияние размера цепных молекул на смазочные свойства жидкостей . . . . .	132
<b>Глава IV. Экспериментальные исследования электрических явлений при резании металлов</b>	
§ 1. Параметры термоэлектрической цепи инструмент — деталь — станок . . . . .	143
§ 2. Влияние состояния термоэлектрической цепи на стойкость режущего инструмента и шероховатость обработанной поверхности . . . . .	151
§ 3. Переменная составляющая термо-э. д. с. и ее роль в изучении динамики контактных процессов . . . . .	159
§ 4. Информационное содержание потенциалграмм при резании в электролитических средах . . . . .	170
<b>Глава V. Теоретическое и экспериментальное обоснования разрушительной функции термотока при резании титановых сплавов</b>	
§ 1. Критический обзор представлений о механизме влияния термотока на износ трущихся пар и металлорежущего инструмента . . . . .	182
	279

§ 2. Термоток как стимулятор схватывания и диффузионного спекания материалов . . . . .	197
§ 3. Некоторые факторы, предопределяющие эффект электрической изоляции инструмента . . . . .	206
§ 4. Роль термоэлектрических явлений в образовании когезионного шва при обработке титановых сплавов . . . . .	216
<b>Глава VI. Трибоэлектрические явления в системах металл — полимер</b>	
§ 1. Введение . . . . .	224
§ 2. Современные представления о механизме электризации трением . . . . .	226
§ 3. Влияние электризации на явления переноса в металлополимерных парах трения . . . . .	230
§ 4. Эффект электрической изоляции инструмента при обработке диэлектрика . . . . .	234
<b>Глава VII. Некоторые физические аспекты магнитной обработки инструмента</b>	
§ 1. Введение . . . . .	237
§ 2. Повышение стойкости сверл путем импульсной магнитной обработки . . . . .	244
§ 3. Магнитострикционное упрочнение быстрорежущих сталей в импульсных магнитных полях . . . . .	249
§ 4. Упругомагнитное взаимодействие тел при напряженных режимах скольжения . . . . .	252
Заключение . . . . .	257
Список литературы . . . . .	259
<i>Приложение I. Способ определения критерия эффективности методов повышения износостойкости инструмента . . . . .</i>	270
<i>Приложение II. Метод аппроксимации функции отклика при многофакторном эксперименте . . . . .</i>	274

**Г. ГОРЬКИЙ**  
Заказное издание

**Станислав Николаевич Постников**

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ И РЕЗАНИИ

Редактор Л. А. Головина.  
Художник В. З. Вешапури.  
Худож. редактор В. В. Кременецкий.  
Техн редактор М. И. Соколова.  
Корректор Г. Н. Орехова.

Сдано в набор 20/V 1975 г. Подписано к печати 19/IX 1975 г. МЦ 00635.  
Бумага типогр. № 2, ф. 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>—17,5 усл.-печ. л.; 18,46 уч.-изд. л.  
Тираж 2000 экз. Заказ 5625. Цена 2 руб.

Волго-Вятское книжное издательство, г. Горький, Кремль, 2-й корпус.  
Типография издательства «Горьковская правда», г. Горький, ул. Фигнер, 32.