

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

537.533.1

ЭКЗОЭЛЕКТРОНЫ \*)*Э. Рабинович*

*Экзоэлектроны — это электроны, эмиттируемые холодной металлической поверхностью. Такие поверхности возникают при износе или растрескивании, связанном с усталостью металла. Таким образом, экзоэлектроны оказались полезными при изучении этих процессов.*

Для исследования износа, а также трещин и других дефектов на поверхности металлов, существует широкий набор методов, таких, как оптическая и электронная микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, автордиография и другие. Однако все эти методы обладают одним существенным недостатком — они дают изображение поверхности, но не дают количественной информации. Таким образом, дипломники, занимающиеся поверхностью твердых тел, обычно ограничиваются коллекционированием симпатичных картинок, с трудом поддающихся количественной обработке. Более того, нет никакой уверенности в том, что видимые на картинке области действительно изображают поверхность в целом. Положение дел существенно улучшилось после появления новой методики детектирования экзоэлектронов, т. е. электронов, эмиттируемых поверхностными атомами при определенных условиях, когда имеется достаточно энергии для такой эмиссии. Оказалось, что эти условия в заметной степени определяются состоянием поверхности и связаны с износом, растрескиванием и усталостью материала в целом. Поскольку экзоэлектроны можно пересчитать, методика дает информацию, которую легко обработать количественно.

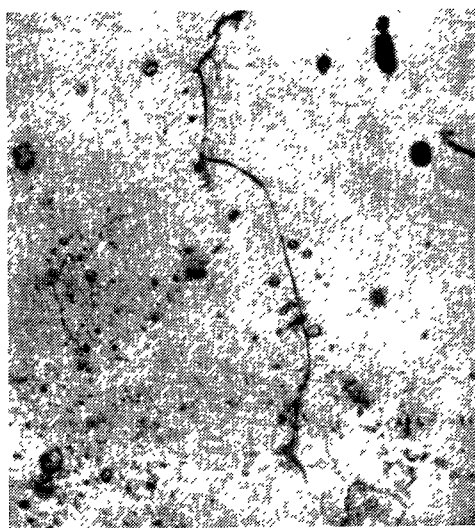


Рис. 1. Примерно так в оптическом микроскопе выглядит трещина усталости в алюминии.

Хотя оптические и другие аналогичные методы обычно эффективны при выявлении трещин и других полостей на поверхности, они не дают информации об их возрасте и развитии.

\*) R a b i n o w i c z Ernest. Exoelectrons.— Scientific American, January 1977, v. 236, No. 1, pp. 74—82. Перевод Е. Б. Логинова.

Эрнест Рабинович — профессор инженерной механики Массачусетского технологического института, США.

Открытие экзоелектронов связано с некой «аномалией» в работе гейгеровских трубок, которые используются для детектирования излучения, в частности, электронов, возникающих при ядерных реакциях или распаде радиоактивных элементов. По существу, гейгеровская трубка представляет собой металлический цилиндр размером с большую сигару, по оси которого проходит тонкая металлическая нить, изолированная от корпуса, а на одном конце имеется герметическое окно из тонкой фольги. Между центральной нитью и корпусом подается высокое напряжение, обычно порядка 1500 в. Попадая через окно в трубку, электроны высокой энергии инициируют электрические разряды, которые можно зарегистрировать и сосчитать. Сразу после появления гейгеровских трубок в 1920 г. было обнаружено, что скорость счета в изготовленной холодным способом трубке очень высока и нерегулярна в течение нескольких первых часов или дней, а потом она нормализуется. Несколько позже было показано, что если в гейгеровскую трубку внести какую-либо металлическую пластинку, приготовленную холодным способом, то скорость счета опять-таки возрастает на некоторое время.

□

Впервые это явление было тщательно исследовано немецким физиком Иоганном Крамером в сороковых годах. Он показал, что любая приготовленная холодным способом металлическая пластинка может испускать

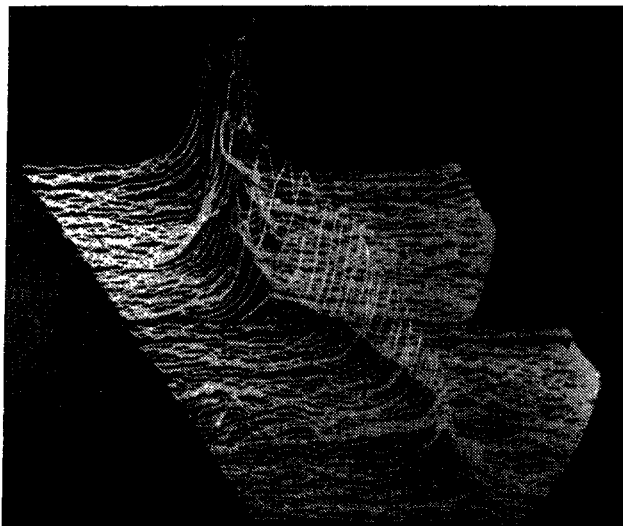


Рис. 2. Экзоелектронное изображение той же самой трещины (ее оптическое изображение представлено на рис. 1) дает информацию, которая легче поддается обработке и потенциально более полезна.

В общем случае чем холоднее поверхность, тем больше эмиттируется экзоелектронов. Представленное здесь изображение получено сканированием поверхности алюминия тонким пучком ультрафиолетового излучения, которое стимулировало эмиссию экзоелектронов. Интенсивность эмиссии временно представляется на экране электронно-лучевой трубки электронным лучом, который сканирует экран так же, как ультрафиолетовый — поверхность металла. Отклонение луча вверх пропорционально интенсивности экзоелектронной эмиссии. Экзоелектронное и оптическое изображение на рис. 1 сделано С. С. Вирманом из Дельфтского технологического университета.

электроны, и, если она помещена внутрь гейгеровской трубки, то эти электроны могут включить механизмы отсчета. Крамер обнаружил, что испускаемые электроны имеют энергию порядка одного электрон-вольта и что эмиссия продолжается в течение нескольких часов или дней после

обработки поверхности. Таким образом, высокая скорость отсчетов новых гейгеровских трубок была в конце концов объяснена.

Физиков удивило сообщение об этом открытии. Дело в том, что в результате работ, уже ставших классическими, были установлены условия, при которых электрон может покинуть поверхность металла, а явление Крамера просто-напросто не удовлетворяло этим условиям. Короче, было хорошо известно, что для того, чтобы удалить электрон из металла, требуется определенное количество энергии. В частности, в меди на выход одного электрона затрачивается 4,3 эв, так что говорят, что медь имеет работу выхода 4,3 эв.

Один из широко известных методов удаления электронов с поверхности металла состоит в том, что поверхность нагревается до высокой температуры. Это дает электрону возможность приобрести посредством термического возбуждения энергию, превышающую работу выхода, и покинуть металл. Этот процесс называется термоэлектронной эмиссией. Другой метод состоит в облучении поверхности ультрафиолетовым излучением. Если длина волны излучения мала настолько, что энергия каждого фотона больше работы выхода, то фотон при соударении может передать энергию электрону и последний получает возможность выско-  
 чить с поверхности металла. Это явление известно как фотоэлектронная эмиссия или фотоэффект (за работу 1905 г., объясняющую фотоэффект, Альберту Эйнштейну была в 1921 г. присуждена Нобелевская премия).

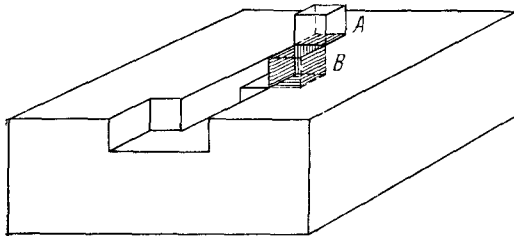


Рис. 4. Одно из объяснений экзотермической эмиссии состоит в том, что энергия, необходимая для вылета экзотермического электрона из металла, освобождается при перескоке атома из слабо связанной в сильно связанную позицию на поверхности.

На схематическом рисунке атом на поверхности связан только в одном направлении — с ближайшим атомом под ним, а пять связей остаются открытыми. При падении в щель, находящуюся на поверхности металла, образуются еще три связи, а свободными остаются только две. При этом выделяется энергия, равная примерно половине энергии испарения атома. Она-то и может помочь экзотермическому электрону вырваться с поверхности металла.

скважину глубиной по крайней мере 4,3 м и качать воду с этой глубины. И вдруг находится кто-то, кто пробурил новую скважину и обнаружил, что вода не только выливается из нее сама по себе, но и образует фонтан высотой в 1 м.

Откуда берется энергия, необходимая для преодоления работы выхода



Рис. 3. Аномалии в работе гейгеровских трубок привели к открытию экзотермических электронов.

Один из самых известных детекторов заряженных ядерных частиц, — гейгеровская трубка — состоит из изолированных друг от друга металлического цилиндра и тонкой проводящей нити вдоль оси цилиндра, между которыми прикладывается напряжение в 1,5 кв. Когда в трубку через окошко из тонкой фольги попадает заряженная частица, то она инициирует газовый разряд, который детектируется. Число разрядов, происходящих за 1 сек, можно легко сосчитать. Было обнаружено, что новая гейгеровская трубка дает неожиданно высокую скорость отсчета в течение нескольких часов или дней. Причиной этому явлению являются экзотермические электроны внутри трубки.

Открытое Крамером явление спонтанной эмиссии электронов было необычным именно вследствие того, что процесс, требующий затраты заметной энергии, происходил самопроизвольно. Хорошей аналогией может служить водоснабжение в местности, где вода находится на глубине 4,3 м. Для того чтобы достать воду, надо пробурить

и вызывающая эмиссию электронов? Крамер считал, что эта энергия тепловая по своей природе. Например, при шлифовке старой поверхности металла снимается слой окисла и остается голая металлическая поверхность. Холодная поверхность немедленно начинает окисляться, освобождая значительное количество химической энергии в форме тепла. Электронная эмиссия наблюдалась также при затвердевании расплавленного металла. В этом случае выделяется теплота плавления и, предположительно, часть освобождаемой тепловой энергии приводит к эмиссии электронов. Поскольку эти процессы являются экзотермическими (в ходе процесса выделяется тепло), Крамер назвал электроны экзoeлектронами. Хотя это

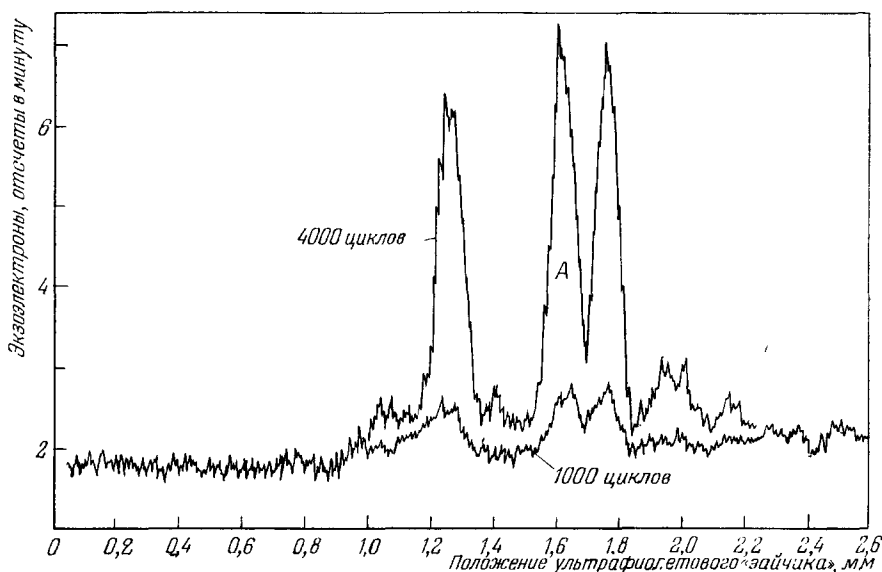


Рис. 5. Исследование роста трещин в алюминиевой ленте методом экзoeлектронной эмиссии, выполненное Дж. Бакстером из исследовательских лабораторий фирмы «Джэнерл моторз».

Лента периодически изгибалась в вакууме. Время от времени с помощью освещения поверхности ультрафиолетовым излучением стимулировалась эмиссия экзoeлектронов. Кривые самописца показывают возрастание эмиссии после 1000 и 4000 циклов нагружения. После 140 000 циклов образец сломался в том месте, которое давало пик А. Это показало, что экзoeлектроны могут указывать местонахождения растущих трещин.

объяснение механизма эмиссии электронов не принято в настоящее время (например, считается, что эмиссия электронов при кристаллизации связана с изменением объема и соответствующим разрушением поверхностного слоя), термин экзoeлектроны сохранился. Иногда, правда, экзoeлектроны называются электронами Крамера.

Изданная в 1950 г. книга Крамера, описывающая его открытие, произвела переполох среди людей, занимающихся поверхностями. Они почувствовали, что экзoeлектроны могут быть полезны в их работе. Физики также прилагали заметные усилия, пытаясь объяснить, как и почему возникают экзoeлектроны. В результате экзoeлектроны сразу были привлечены к изучению широкого круга поверхностных явлений: трения, усталости, резания и размалывания металла, качения, катализа, коррозии, изломов, пластической деформации и многих других. Кроме того, было сделано множество попыток физическими и химическими методами объяснить свойства экзoeлектронов и открыть механизм их возникновения. Некоторые из этих работ опубликованы, большинство — нет.

□

Я буду обсуждать поочередно научные и инженерные аспекты проблемы экзoeлектронов. Что касается появления экзoeлектронов, то не может быть сомнения в том, что если обработанная холодным способом поверхность металла теряет электрон, то должен быть какой-то источник энергии. Два источника, которые имеет свежая поверхность и не имеет старая, можно назвать сразу. Одним из них является энергия химической связи в металле. Рассмотрим сильно упрощенную схему освобождения этой энергии. На обработанной холодной поверхности атомы могут занимать такие положения, что некоторые их химические связи остаются свободными. Затем, если они связываются с другими атомами металла, то число свободных связей уменьшается, освобождаясь энергия может быть выделена в форме тепла или может пойти на образование экзoeлектрона. Вторым источником энергии уже обсуждался — это энергия окисления или какого-либо аналогичного процесса.

Нетрудно оценить энергию, выделяющуюся в каждом процессе. В качестве предельного случая первого механизма рассмотрим атом, находящийся на поверхности и связанный только с одним атомом (вместо шести, будь он внутри кристалла). Упав в ближайшую щель в решетке, атом удерживался бы уже связью с четырьмя атомами. В начальном состоянии он был испарен на пять шестых (испаренный атом не связан с другими), после падения — только на две шестых. Следовательно, при таком изменении положения атома освобождается порядка трех шестых (т. е. половина) энергии испарения атома меди, которая равна 2,9 эв. Таким образом, при перестройке атомов на поверхности может выделиться около полутора электрон-вольт. Что касается второго механизма, то при окислении атома меди в  $\text{CuO}$  выделяется 0,8 эв (окисление в  $\text{Cu}_2\text{O}$  дает примерно такой же выигрыш в энергии).

Из этих вычислений видно, что не так-то просто объяснить, откуда электрон берет необходимые для выхода из металла 4,3 эв, не говоря уже о типичной кинетической энергии в 1 эв. Одна из возможностей состоит в том, что атом одновременно окисляется, перескакивает в более сильно связанное положение в решетке и к тому же флуктуационным образом приобретает большое количество тепловой энергии. Может быть, при окислении образуется тонкий окисный слой с уменьшенной работой выхо-

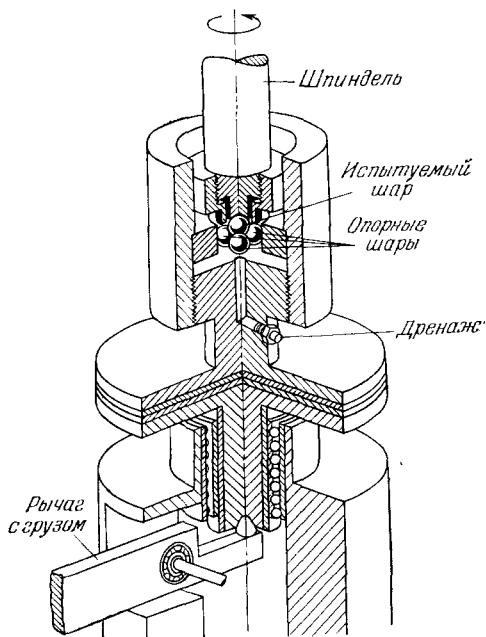


Рис. 6. Усталость шарикоподшипников исследуется в приборе, в котором испытуемый шар катится по трем другим и вращается со скоростью 3560 оборотов в минуту.

На шары непрерывно подается холодная смазка. Контакт между верхним шаром и нижними происходит только по узкому следу. Напряжение, испытываемое верхним шаром, определяется весом груза на рычаге. Когда микрофон обнаруживает вибрацию, означающую, что в каком-либо шаре развились значительные поверхностные дефекты, испытание прекращается.

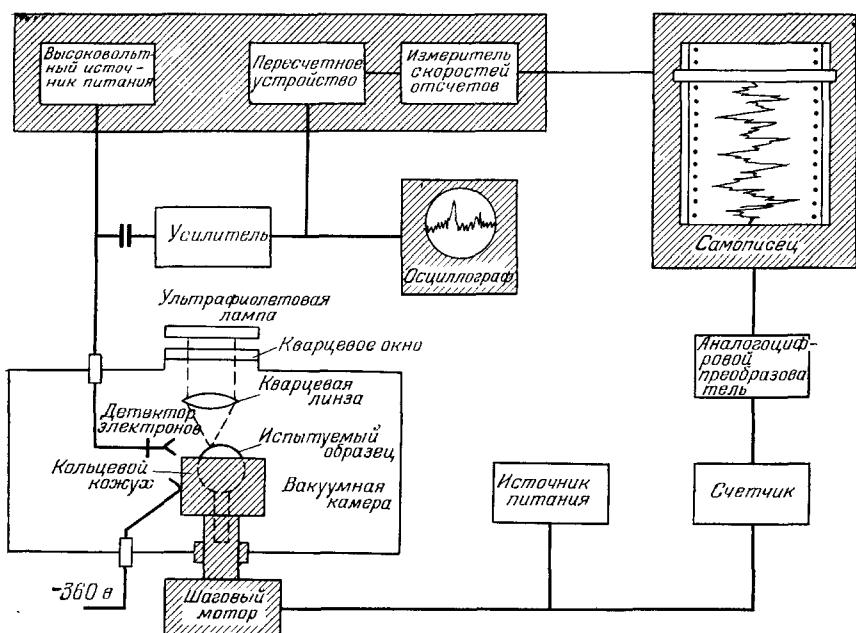


Рис. 7. Схема установки, на которой автор мерил экзоэлектронную эмиссию от шарикоподшипников в Массачусеттском технологическом институте.

Вынутые из прибора, показанного на рис. 6, очищенные от смазки шары помещались в вакуумную камеру так, чтобы узкий пучок ультрафиолетового излучения попадал на след, по которому происходил основной износ при вращении шаров. Этот пучок стимулировал эмиссию экзоэлектронов, скорость которой представлялась на экране осциллографа и вычерчивалась графопостроителем.

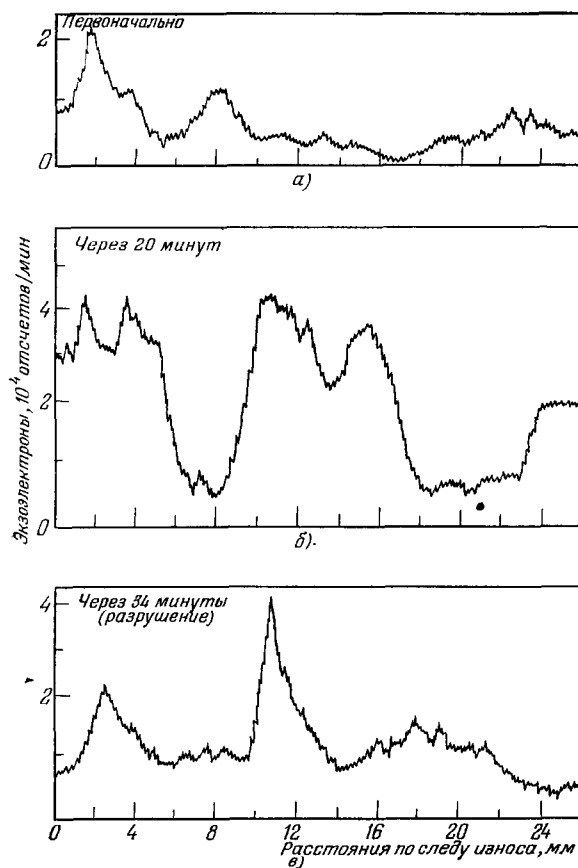


Рис. 8. История разрушения шарикоподшипника может быть прослежена, если в ходе испытания время от времени наблюдать эмиссию экзоэлектронов от различных участков поверхности шара.

Эти графики построены на установке, показанной на рис. 7. На верхнем графике показана экзоэлектронная эмиссия до испытания, на следующем — после двадцатиминутного испытания. В конце концов на 34-й минуте от шара откололся кусок материала. Узкий пик на графике показывает положение осколка.

да, — скажем, порядка двух электрон-вольт. Однако при этом для того, чтобы выйти, электрону необходимо преодолеть этот слой. Подлежит рассмотрению также и адсорбция молекул окружающего газа, которая дает некоторый вклад в энергию.

□

После рассмотрения этих возможностей создается впечатление, что эмиссия экзоелектронов зависит от невероятного стечения благоприятных обстоятельств. Фактически вычисления, основанные на скорости экзоелектронной эмиссии, подтверждают, что это явление довольно редкое. При шлифовке одного квадратного сантиметра поверхности металла открывается около  $10^{15}$  атомов. Если бы экзоелектронная эмиссия была нормальным явлением, то следовало бы ожидать, что каждый атом является источником хотя бы одного электрона, так что по прошествии нескольких дней полный выход был бы порядка  $10^{15}$  экзоелектронов. Однако даже при самых благоприятных условиях выход экзоелектронов не превышает  $10^8$ , т. е. значительно ниже. Таким образом, только в одном из 10 миллионов источников имеют место необходимые для эмиссии электрона стечения обстоятельств.

До сих пор оказывалось так, что каждый специалист по экзоелектронам имеет собственное мнение насчет того, какое именно стечение обстоятельств может привести к экзоелектронной эмиссии.

Одна из проблем в том и состоит, что каждый исследователь подгоняет условия эксперимента под свой тест и обнаруживает, что его результаты расходятся с результатами других авторов. Кажется вполне вероятным, что при различных условиях работа выхода, которая сама меняется в результате химического воздействия и загрязнения поверхности, компенсируется различными комбинациями механической, тепловой, химической энергии и энергии адсорбции молекул газа.

Потребители экзоелектронов быстро обнаружили, что экзоелектронная эмиссия может давать информацию о многих поверхностных эффектах. Например, когда необработанный материал помещают в шаровую мельницу (по существу, вращающийся барабан, заполненный стальными шарами), для того, чтобы измельчить его в порошок, сначала происходит равномерное уменьшение размера частиц, но затем измельчение в конце концов прекращается совсем. Это явление полностью отображается изменением скорости эмиссии электронов частицами, которая довольно высока на первой стадии и потом монотонно уменьшается. Другой пример ясен из того, что происходит при скольжении одного металла по другому под различной нагрузкой. При большой нагрузке эмиттируется больше экзоелектронов, чем при маленькой. Это неудивительно, так как при большей нагрузке большая часть поверхности испытывает нарушение. Хотя корреляция экзоелектронной эмиссии с нагрузкой представляется весьма интересной, пока не видно способа использовать экзоелектронную эмиссию для того, чтобы достичь нового понимания явления трения.

Дело в том, что, не зная в точности условий, при которых возникают экзоелектронны, нельзя использовать их для получения новой информации о каком-либо явлении. Однако, как мы видели, именно эта проблема и не решена. Интерес к экзоелектронам достиг максимума в 1957 г., когда проходила конференция на эту тему, а затем главным образом из-за отсутствия успехов в объяснении механизма эмиссии, опустился до минимума в середине шестидесятых годов. В конце шестидесятых годов интерес снова возрос в связи с открытием новых областей возможного применения этого явления, часть из которых я опишу ниже.



Одной из новейших областей применения является использование экзoeлектронной эмиссии как показателя радиационных повреждений или радиационного облучения. Обнаружено, что если определенные неорганические материалы, такие как сульфат кальция, фторид лития или

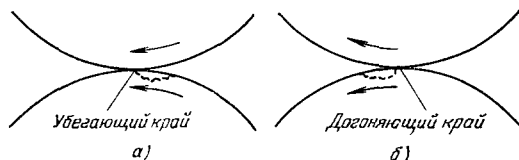


Рис. 9. Трещина, ведущая к разрушению шара, может расти или от убегающего края будущего обломка к догоняющему (слева) или наоборот (справа).

До развития методов экзoeлектронной эмиссии имелись только косвенные методы наблюдения роста трещин.

Рассматривается возможное использование этого явления в приборах многократного пользования для дозиметрии облучения людей, работающих на ядерных заводах и подобных предприятиях. Метод имеет определенные преимущества перед другими дозиметрическими методами, которые измеряют утечку электростатического заряда или экспозицию фотопленки.

Недавно экзoeлектронны нашли применение в исследовании развития трещин в твердых телах, особенно в ходе усталости. Усталостные повреждения — это вид повреждений в твердых телах, подвергнутых периодически меняющейся нагрузке. Пусть металлический стержень периодически растягивается и сжимается. Если напряжение ниже предела текучести металла, то он выдержит первое нагружение без ущерба для себя. Однако если продолжать поперечное нагружение достаточно долго, то в конце концов из-за усталости стержень сломается.

Первые же исследования показали, что в подобных случаях в металле образуются микротрещины, которые в последующих циклах нагружения растут до тех пор, пока материал не сломается. На ранних стадиях усталости трещины не только трудно заметить из-за

малых размеров, но и нет способа предсказать, какие из них будут расти, а какие нет. Таким образом, рост трещин долгое время оставался неразрешимой проблемой. Поскольку при росте трещины образуются открытая холодная поверхность, следует ожидать эмиссии экзoeлектронов от нее, что и имеет место в действительности. В результате теперь экзoeлектронны используются в излучении образования и роста трещин.

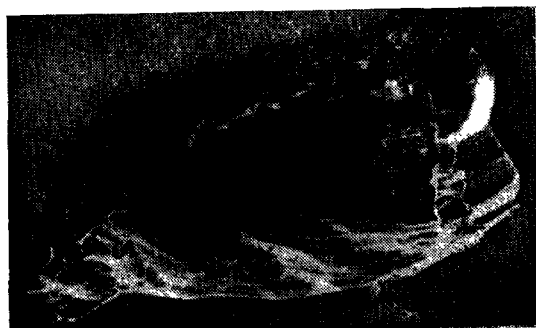


Рис. 10. Изображение типичного осколка, полученное методом сканирующей электронной микроскопии.

Осколок имеет длину 1,8 мм; убегающий конец изображен в левой части рисунка.



При этих исследованиях желательно точно знать место, откуда происходит эмиссия. Для этого в числе других можно использовать чисто механический метод — маска с маленьким отверстием медленно сканирует поверхность образца и в любой момент известно, откуда вылетел экзoeлектрон, достигший детектора. Результаты ранних работ с экзoeлектронами помогли найти более остроумное решение. Для выяснения механизма эмиссии экзoeлектронов в этих работах исследователи подавали на поверхность энергию в различных формах (тепло, свет или механические колебания), тем самым вызывая эмиссию, и смотрели, что получается. При этом было обнаружено возрастание числа электронов при подводе энергии извне. В этом случае освобождаемые электроны называются вынужденными экзoeлектронами. Наиболее эффективным стимулятором является ультрафиолетовое излучение. При этом частота излучения должна быть такой, чтобы энергия каждого кванта была ниже работы выхода, в противном случае экзoeлектронная эмиссия не видна на фоне обычной фотоэмиссии.

Облучение ультрафиолетовым излучением может повысить число эмиттируемых электронов более чем в 10 000 раз. Это означает, что если освещать небольшой участок поверхности, а мерить эмиссию со всей поверхности, то практически все эмиттируемые электроны выходят с освещенного места. Следовательно, достаточно прочертить лучом по поверхности образца и измерить эмиссию как функцию времени. Скорость отсчета в различные моменты времени показывает эмиссию с разных участков поверхности.

□

Одна из демонстраций того, какую информацию можно получить таким способом, опубликована в работе У. Дж. Бакстера из исследовательских лабораторий фирмы «Джэнерл моторз». Он поместил в вакуумную камеру, содержащую электронный детектор, алюминиевую ленту и периодически изгибал ее. Одновременно он медленно сканировал поверхность сфокусированным пучком ультрафиолетового излучения. До нагружения экзoeлектронная эмиссия отсутствовала. Спустя 1000 циклов из трех мест была замечена эмиссия, превышающая среднюю. После 4000 циклов превышение эмиссии от активных участков над средней стало еще заметнее. Наконец, после 140 000 циклов в одном из этих мест произошло разрушение. Ясно, что активные участки являются местами, где образуются и растут трещины. Поскольку до этого не существовало способа распознавания микротрещин и наблюдения за процессом их роста, результаты Бакстера возбудили широкий интерес.

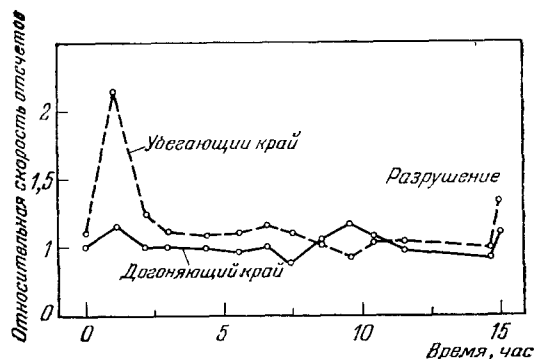


Рис. 11. Экзoeлектронная эмиссия от шара, от которого откололся кусок, изображение которого представлено на рис. 9, позволила автору установить тот факт, что трещина, приведшая к разрушению, зародилась в том месте, где был убегающий край обломка.

Пунктировой линией представлена эмиссия от убегающего края, а сплошной — от догоняющего. Очевидно, трещина зародилась на убегающем конце обломка, затем росла внутри шара и поэтому ее роста не было видно, и потом возникла на догоняющем конце.

Работа Бакстера побудила меня и моих коллег в Массачусетском технологическом институте применить эту методику к исследованию роста трещин в приборах с контактным качением — процесса, связанного с износом из-за усталости поверхности, основной причины разрушения шариковых и роликовых подшипников, а также износа зубчатых передач и катящихся по дороге колес. В шариковых подшипниках поверхностная усталость развивается следующим образом: сначала на одном из шаров образуется и медленно растет трещина, пока наконец не отламывается осколок ощутимых размеров. Как только это произойдет, подшипник быстро выходит из строя.

Износ из-за усталости поверхности трудно контролировать вследствие очень сильного статистического разброса времени, за которое происходит разрушение. Так, при испытании сотни шаров, времена, за которые происходит разрушение первого и последнего шаров, могут отличаться в сто

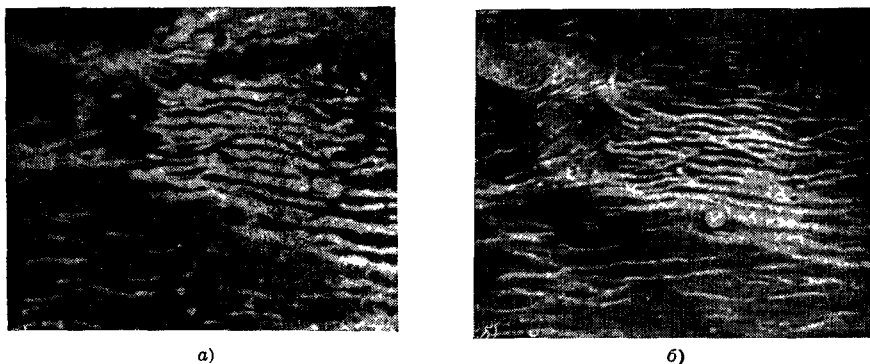


Рис. 12. Сравнение двух методов обнаружения трещин в стали, подвергнутой пластической деформации.

а) Экзоэлектронная микрограмма, на которой яркость пропорциональна эмиссии экзоэлектронов.  
б) Изображение того же участка поверхности, полученное методом сканирующей электронной микроскопии; трещины на поверхности представлены яркими линиями. Картина экзоэлектронной эмиссии точно воспроизводит картину трещин. (Микрограммы сданы Бакстером и Стэнли Р. Раузом из Исследовательских лабораторий фирмы «Джэверл моторз».)

и более раз. Дополнительная трудность заключается в том, что макроскопические измерения не дают возможности проконтролировать предстоящую поломку шара. На микроскопическом уровне трещины можно обнаружить, но остается открытым вопрос о том, будут ли они расти и в каком именно месте. Если быть точным, то при сильном увеличении видны многие мелкие трещины, но нет прямого пути установить, какая из них быстро растет и в конце концов приведет к разрушению. Таким образом, нам казалось, что экзоэлектроны могли бы дать способ обнаружения опасных трещин и наблюдения за их ростом.

Экспериментальная часть задачи оказалась довольно сложной. Поскольку длина свободного пробега экзоэлектронов в воздухе мала, приходится проводить эксперименты с ними в вакууме. С другой стороны, имеет смысл производить испытания шарикоподшипников при тех же условиях, при каких они обычно работают, т. е. на воздухе и со смазанной поверхностью. Следовательно, для того, чтобы измерить экзоэлектронную эмиссию от шариковых подшипников, потребовалось бы испытание на стенде, после предварительной смазки. Затем необходимо смыть масло растворителем, просушить, положить шариковые подшипники в камеру, откачать воздух и начать измерения, надеясь, что все эти манипуляции не повлияли на экзоэлектронную эмиссию. Когда мои коллеги узнали об

эксперименте, многие сомневались в том, что экзоэлектроны вообще будут зарегистрированы, но мы решили идти вперед во что бы то ни стало. Исследовательский центр Армии США предложил финансировать эту работу.

Использовались две отдельные установки — прибор для испытания на усталость, где подшипники испытывали напряжение, и вакуумная камера, в которой должны были регистрироваться экзоэлектроны. Для испытания на усталость был взят тестер Баруэлла на четырех шарах, где испытываемый шар, удерживаемый шпинделем и вращающийся со скоростью 3560 оборотов в минуту, катится по трем шарам, находящимся под ним, которые с помощью системы из диска и кольца вынуждены двигаться по окружности. Диаметр каждого шара равен половине дюйма. (Установлено, что результаты испытания на этом приборе хорошо согласуются с результатами испытаний обычных шариковых подшипников, в которых между наружным и внутренним кольцами находится большое количество шаров.) В рабочий объем непрерывно подается смазка. Прикрепленный к прибору микрофон измеряет вибрацию и автоматически отключает питание в том случае, если какой-либо шар начинает дробиться. Геометрия такова: только узкий след на поверхности верхнего шара находится в контакте с остальными так, что усталость и разрушение происходит именно здесь. Таким образом, следует измерить экзоэлектронную эмиссию только от верхнего шара.

Для стимуляции экзоэлектронной эмиссии использовалось ультрафиолетовое излучение, которое проходило через кварцевое окно и фокусировалось линзой из кварца. Представленные здесь результаты получены при размере светового пятна  $2 \times 0,27 \text{ мм}^2$ . Эмиттируемые электроны детектировались электронным умножителем, выходные импульсы которого суммировались и воспроизводились на оси у графопостроителя.

□

Первоначально была измерена экзоэлектронная эмиссия от смазанного шара, оцарапанного алмазной чертилкой и очищенного с помощью обезжиривателя Фреона. Как и ожидалось, при освещении царапины ультрафиолетовым пучком детектор регистрировал резкий пик экзоэлектронной эмиссии. Затем был выполнен ряд испытаний на износ. В типичном испытании шары испытывались на стенде Баруэлла под напряжением, при котором ожидаемое время пробега равнялось сорока минутам. Каждые десять минут верхний шар вынимался, исследовался на эмиссию экзоэлектронов и возвращался обратно для дальнейшего пробега. Через 34 минуты испытания шар раздробился. При исследовании следа износа через 20 минут после начала испытаний на нем имелись резкие пики экзоэлектронной эмиссии. Место, откуда получался один из пиков, и оказалось местом дробления.

Кроме того, экзоэлектроны не только дали возможность указать место разрушения из-за усталости поверхности, но и пролили свет на механизм разрушения. Например, если шариковый подшипник нагружают в испытательном приборе (или во время эксплуатации) так, что шары катятся по примыкающей поверхности все время в одном направлении, трещина, возникающая на поверхности, обычно растет внутрь под некоторым углом и в конце концов может привести к отщеплению осколка. Возникает вопрос: куда растет трещина — в направлении вращения или в противоположном? С помощью изучения зависимости от времени экзоэлектронной эмиссии вблизи трещины был найден ответ на этот вопрос.

Наши исследования показали, что передний край будущего осколка довольно рано дает заметный пик экзоэлектронной эмиссии, который при испытаниях ослабевает по мере того, как трещина растет под поверх-

ностью и параллельно ей. В то же время задний край вплоть до отщепления не дает заметного превышения фона. Следовательно, трещина растет от переднего к заднему краю будущего осколка, что согласуется с ранними работами по этому вопросу, где содержатся косвенные доказательства.

В нашей работе с шарикоподшипниками ультрафиолетовый пучок можно было направить на единичную трещину из-за локализованности напряжений в стенде Баруэлла. Однако нетрудно себе представить методику, в которой узкий ультрафиолетовый луч прочерчивает поверхность образца по растровой схеме, а экзоэлектронная эмиссия одновременно представляется вертикальным отклонением электронного пучка, сканирующего экран электронно-лучевой трубки. Впервые такая методика была использована в 1969 г. С. С. Вирманом из Дельфтского технологического университета в Нидерландах. Его экзоэлектронное изображение трещины усталости в алюминии напоминает горный хребет (см. рис. 2).

В аналогичном сканирующем методе скорость экзоэлектронной эмиссии модулирует интенсивность электронного пучка по типу телевизионного изображения. В таких картинках светлые пятна соответствуют областям усиленной эмиссии экзоэлектронов.

Предсказывать, к чему приведет дальнейшее развитие исследований явления экзоэлектронной эмиссии, довольно рискованно. Вероятно, в следующее десятилетие окажется возможным детектировать экзоэлектроны в воздухе. Тогда этим методом легко можно будет проверять, например, нет ли растущих трещин усталости на крыльях самолета. С возрастанием скорости поездов большое значение приобретает развитие простого и надежного метода выявления зарождающихся трещин в колесах и путях; может быть, экзоэлектронная методика поможет нам и здесь. Возможно, экзоэлектроны удастся использовать в прогнозировании землетрясений путем указаний на то, какие трещины в поверхности Земли и в платформе под поверхностью являются растущими. Я подозреваю, что когда мы больше узнаем о точных законах экзоэлектронной эмиссии, то появятся такие применения, которые сегодня трудно себе представить.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Kramer J. Der Metallische Zustand.—Vanderhoeck and Ruprecht, 1950.  
Grinberg L.—Brit. J. Appl. Phys., 1958, v. 9, No. 3, p. 85.  
Veerman C. C.—Mater. Sci. and Eng., 1969, v. 4, p. 329.  
Bascter W. J.—J. Appl. Phys., 1973, v. 44, p. 608.  
Lausch W.—Kernenergie, 1974, v. 17, Nr. 5, S. 129.