

02; 03; 04; 05; 12

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА ПАРАМЕТРЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ АДГЕЗИОННОМ И КОГЕЗИОННОМ РАЗРУШЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В. А. Ключев, Ю. П. Топоров, А. Д. Алиев, А. Е. Чалых,  
А. Г. Липсон

При исследовании рентгеновского излучения, возникающего при отслаивании полимерных пленок от поверхности стали и при расслаивании образцов слюды, обнаружена существенная зависимость его параметров от давления воздуха. Установлено, что интенсивность излучения при уменьшении давления проходит через максимум при давлениях  $10^{-1}$ — $10^{-2}$  мм рт. ст., а энергия рентгеновских фотонов монотонно возрастает с улучшением вакуума, достигая максимума при давлении ниже  $10^{-5}$  мм рт. ст. При этих давлениях в спектре излучения наблюдается характеристическая компонента. На основе установленных зависимостей параметров излучения от давления окружающей среды делается вывод о том, что генерация рентгеновского излучения при разрушении связей в условиях высокого вакуума обусловлена не только торможением эмиттируемых стеной трещины электронов, но и взаимодействием электронов и ионов в плазменных микрообразованиях типа вакуумной искры.

Известно, что разрушение твердых тел и нарушение адгезионных связей сопровождается возникновением на свежесформированных поверхностях нескомпенсированных электрических зарядов [1]. Электрические поля, возникающие между заряженными разъемными стенками трещины, столь высоки, что происходят электрические пробои. При осуществлении разрыва адгезионных и когезионных связей в атмосфере или среднем вакууме возникает газовый разряд, подчиняющийся закону Пашена [1]. В условиях высокого вакуума интенсивность газоразрядного свечения перестает подчиняться этому закону [2-4]. При этом было обнаружено, что при переходе от среднего вакуума к высокому происходят существенные изменения как в спектральном составе излучения, так и в форме и длительности импульсов свечения. На основании этих данных можно предположить, что механизмы протекания газоразрядных процессов при адгезионном и когезионном разрушении твердых тел в условиях высокого и среднего вакуума принципиально отличны.

Одним из путей проверки этого предположения является исследование зависимости от давления среды спектра рентгеновского излучения (РИ), наблюдающегося при адгезионном и когезионном разрушении твердых тел [5, 6], что и было проведено в настоящей работе.

Методика проведения экспериментов заключалась в изучении параметров РИ, возникающего при отслаивании пленок КЛТ (каучуковая композиция на лавсановой основе ТУ-6-17-705-75) от поверхности стальных образцов и при расщеплении кристаллов слюды. Нарушение адгезионных и когезионных связей осуществлялось непосредственно в камере сканирующего электронного микроскопа JSM-ИЗ, снабженного приставкой для электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа типа «Кевех» при изменении давления остаточных газов в камере от  $10^{-6}$  мм рт. ст. до атмосферного. При этом использование полупроводникового детектора рентгеновского излучения позволяло фиксировать не только число фотонов и их энергетическое распределение, но

и производимой идентификацию характеристических линий наблюдаемого излучения.

Проведенные нами эксперименты показали, что спектр РИ, возникающего как при адгезионном, так и при когезионном разрушении твердых тел, состоит обычно из тормозного и характеристического излучений. Как видно из рис. 1, на фоне тормозного излучения достаточно четко проявляются характеристи-

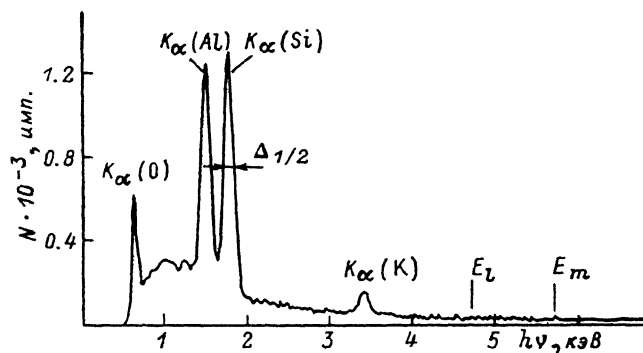


Рис. 1. Спектр рентгеновского излучения при расщеплении кристаллов слюды при давлении остаточных газов  $10^{-1}$  мм рт. ст.

ческие  $K_{\alpha, \beta}$  линии элементов, составляющих кристаллическую решетку слюды: кислорода, алюминия, кремния и калия. При этом интенсивность полученных линий находится в соответствии с процентным содержанием этих элементов в кристалле слюды. Аналогичный вид спектра РИ наблюдается и при нарушении адгезионных связей с той лишь разницей, что характеристическое излучение в данном случае состоит из  $L_{\alpha\beta}$ ,  $K_{\alpha, 1, 2}$  и  $K_{\beta, 1, 2}$  линий железа — основного элемента в составе подложки разрушаемой адгезионной пары.

Для анализа параметров РИ были выбраны такие его характеристики, как скорость счета импульсов РИ, их энергетический состав и ширина характеристических линий на полувысоте максимума ординаты пика.

Для определения влияния давления окружающей среды на параметры РИ на первом этапе работы было приведено исследование зависимости скорости счета импульсов  $J$  от давления. При этом методика сбора информации позволяла определять скорость счета суммарного потока РИ и измерять отдельно скорости счета импульсов характеристического и тормозного излучений.

Зависимости скорости счета суммарного потока характеристического и тормозного излучений от давления остаточных газов воздуха при разрыве когезионных и адгезионных связей (рис. 2) имеют как общие, так и отличительные черты. Так, если при расщеплении слюды появление РИ наблюдается даже при атмосферном давлении, то при нарушении адгезионной связи появление фотонов РИ зафиксировано только при давлении ниже 1 мм рт. ст. В обоих случаях зависимость скорости счета РИ от давления остаточных газов имеет немонотонный характер. При расщеплении слюды она достигает максимума в интервале давлений 1—0.1 мм рт. ст., а при отслаивании пленки КЛТ от поверхности стали — в интервале  $5 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., причем этот ма-

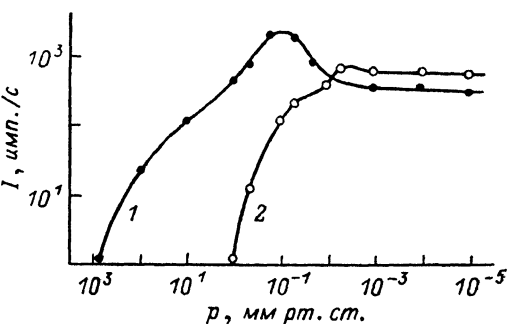


Рис. 2. Зависимости скорости счета регистрации суммарного потока характеристического и тормозного излучений от давления остаточных газов воздуха при разрушении кристаллов слюды (1) и при отслаивании пленки КЛТ от стальной подложки (2).

ксимум выражен менее четко. И наконец, при достижении давления остаточных газов  $10^{-3}$  мм рт. ст. и в случае расщепления слюды, и в случае нарушения адгезионного контакта скорость счета РИ стабилизируется и не изменяется с дальнейшим понижением давления. Здесь следует отметить, что начиная с этого давления остаточных газов стабилизируется также интенсивность светового излучения и газоразрядные процессы перестают подчиняться закону Пашена.

Аналогичный вид имеют и кривые зависимости скорости счета фотонов тормозного и характеристического излучений от давления остаточных газов (рис. 3, 4). Как видно из этих рисунков, появление характеристического излучения наблюдается при более высоком вакууме, чем появление тормозного излучения.

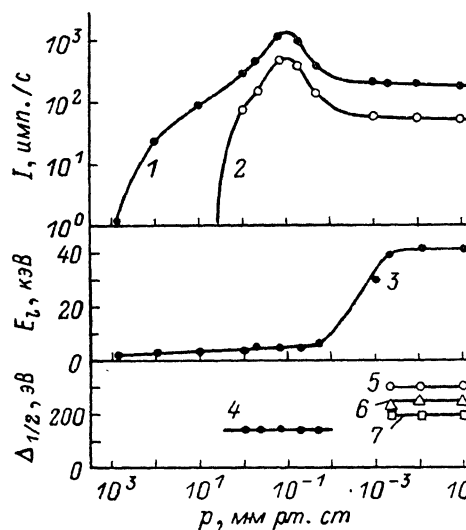


Рис. 3. Зависимости скорости счета импульсов тормозного излучения (1), характеристического излучения  $K_{\alpha\beta}$  линии алюминия (2), «эффективной» коротковолновой границы тормозного излучения (3) и ширины характеристических линий на полувысоте максимума ординаты пика (4—7) от давления остаточных газов воздуха при разрушении кристаллов слюды.

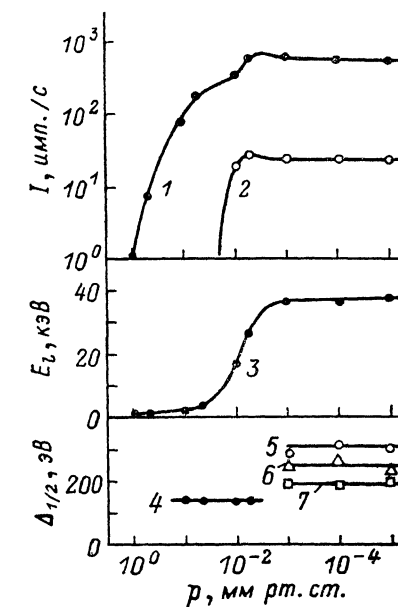


Рис. 4. Зависимости скорости счета регистрации тормозного излучения (1), характеристического излучения  $K_{\alpha_1, 2}$  линии железа (2), «эффективной» коротковолновой границы тормозного излучения (3) и ширины характеристических линий на полувысоте максимума ординаты пика (4—7) от давления остаточных газов воздуха при отслаивании пленки КЛТ от стальной подложки.

Однако общий ход кривых подобен, и при достижении давления остаточных газов  $10^{-3}$  мм рт. ст. скорости счета на всех кривых стабилизируются и с дальнейшим понижением давления практически не изменяются.

Особый интерес в исследованиях РИ при разрушении представляет вид тормозного спектра (рис. 1). Во-первых, на нем нельзя выделить четкой коротковолновой границы. Его коротковолновую область можно разделить на два участка: 1) монотонно затухающий по интенсивности с увеличением энергии фотонов участок до некоторой «эффективной» коротковолновой границы  $E_l$ ; 2) за границей  $E_l$ , на котором фиксируются отдельные выбросы фотонов с максимальной энергией  $E_m$ . Число импульсов на этом участке также постепенно затухает с увеличением энергии фотонов. Таким образом, величины «эффективной» коротковолновой границы  $E_l$  и максимальной энергии регистрируемых фотонов  $E_m$  также зависят от давления остаточных газов, при котором происходит разрушение образцов.

Зависимость  $E_l$  от давления остаточных газов носит немонотонный характер. В интервале давлений от атмосферного до  $\sim 10^{-2}$  мм рт. ст. происходит плавное возрастание величины энергии  $E_l$ , что свидетельствует о возрастании

энергии электронов в зоне развивающейся трещины. Этим объясняется и запаздывание появления характеристического РИ по сравнению с тормозным РИ при уменьшении давления остаточных газов. Поскольку для возбуждения характеристических линий требуются электроны с вполне определенной энергией, то появление характеристических линий в спектре РИ может свидетельствовать о том, что создание условий для набора электронами энергии, достаточной для возбуждения характеристических линий, возможно только при определенных (достаточно малых) давлениях остаточных газов окружающей среды. При этом чем больше требуется энергия для возбуждения характеристических линий элементов, входящих в состав разрушаемого образца, тем при более низком давлении остаточных газов начинают проявляться эти линии.

В области давлений  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  мм рт. ст. происходит резкое возрастание величины «эффективной» коротковолновой границы  $E_i$ . В этой же области давлений наблюдается некоторое снижение скорости счета импульсов РИ. Очевидно, что эта область является переходной от одних механизмов газоразрядных процессов к другим. После прохождения этой области начиная с величины давления остаточных газов  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  (при расщеплении слюды) и  $\sim 10^{-3}$  мм рт. ст. (при отслаивании пленки КЛТ от поверхности стали)  $E_i$  стабилизируется на значении  $\sim 40$  кэВ и при дальнейшем улучшении вакуума не изменяется. Здесь следует отметить, что начиная с этой области давлений в РИ появляются фотоны с максимальной энергией  $E_m = 70$ — $80$  кэВ, в то время как в переходной области  $E_m$  не превосходит  $20$ — $40$  кэВ, а в области начального разрежения  $E_m$  не превышает  $10$  кэВ. Кроме того, в области низкого давления остаточных газов изменение числа фотонов с увеличением их энергии для фотонов с энергией больше  $20$  кэВ начинает подчиняться экспоненциальной зависимости [7].

На различные механизмы протекания газоразрядных процессов при нарушении адгезионных связей и разрушении твердых тел в области среднего и низкого давлений остаточных газов указывает и изменение ширины характеристических линий  $\Delta_{1/2}$  на полувысоте максимума ординаты пика (рис. 1). Эта величина оказалась различной для одних и тех же характеристических линий, полученных при разрушении образцов при различных давлениях остаточных газов (кривые 4—7 на рис. 3, 4). Если разрушение образцов происходит в области средних давлений остаточных газов, т. е. до переходной области ( $10^{-2}$ — $10^{-3}$  мм рт. ст.), то величина  $\Delta_{1/2}$  для всех характеристических линий элементов, полученных как при расщеплении слюды, так и при отслаивании ленты КЛТ от стальной поверхности, равна  $140$  эВ, что соответствует аппаратному разрешению используемой системы регистрации (кривые 4 на рис. 3, 4). Эта же величина  $\Delta_{1/2}$  получается и при исследовании используемых образцов с помощью электронно-зондового микроанализа, когда поверхность образца облучается электронным пучком от электронной пушки. При этом величина  $\Delta_{1/2}$  не изменяется ни при изменении энергии облучающих электронов, ни при сканировании электронного луча по поверхности образца.

Однако при переходе условий разрушения из области среднего давления в область низкого давления остаточных газов для всех характеристических линий наблюдается увеличение величины  $\Delta_{1/2}$ , причем как для разных элементов, так и для разных серий одного и того же элемента это увеличение было различно. Так, например, в процессе разрушения слюды (рис. 3) ширина характеристической  $K_{\alpha 3}$  линии алюминия достигает  $190$  эВ (кривая 7), кремния —  $260$  эВ (кривая 6), а калия —  $290$  эВ (кривая 5). При отслаивании пленки КЛТ от поверхности стали (рис. 4) ширина  $K_{\alpha_{1,2}}$  линии железа на полувысоте пика составляет  $190$  эВ (кривая 7),  $K_{\beta_{1,3}}$  —  $250$  эВ (кривая 6), а для  $L_{\alpha 3}$  линии —  $310$  эВ (кривая 5). Кроме того, в области между  $K_{\alpha_{1,2}}$  и  $K_{\beta_{1,3}}$  линиями наблюдается дополнительное излучение фотонов, наиболее интенсивное в районе  $6.7$  кэВ, что не наблюдается ни при облучении поверхности стали электронами от электронной пушки, ни при отслаивании пленки КЛТ от поверхности стали в области средних давлений остаточных газов.

Полученные закономерности в исследовании параметров РИ при разрушении связей в условиях различных давлений остаточных газов позволяют сде-

дать некоторые предположения о физических процессах, протекающих в зоне развивающейся трещины.

Если разрушение производится в условиях средних давлений остаточных газов, когда зависимость интенсивности светового излучения подчиняется закону Пашена и его спектральные характеристики указывают на развитие в зоне разрушения процессов газового разряда, то процесс увеличения величины потока РИ с понижением давления остаточных газов, прохождение его через максимум с последующим снижением можно объяснить следующим образом. По мере снижения давления остаточных газов создаются все более благоприятные условия для развития газового разряда, и при определенном давлении возникают оптимальные условия для его протекания. При переходе к более низкому давлению газоразрядные процессы начинают подавляться.

На величину потока РИ этот процесс сказывается следующим образом. По мере разгара газового разряда происходит слесное размножение свободных электронов, которые, ускоряясь в зоне разрушения между разноименно заряженными стенками трещины, при торможении в материале положительно заряженной стенки вызывают РИ. При достижении оптимальных условий протекания газового разряда размножение электронов максимально и на кривых зависимости потока РИ от давления остаточных газов наблюдается максимум. Кроме того, поскольку при понижении давления остаточных газов происходит возрастание разрядного промежутка, в котором и происходит ускорение электронов, то за счет увеличения расстояния, на котором происходит их ускорение, энергия тормозящихся электронов возрастает, что и сказывается на увеличении  $E_i$ .

Таким образом, механизм генерации РИ при нарушении адгезионных связей и разрушения твердых тел в условиях средних давлений можно представить следующим образом: в результате заряжения свежесформированных поверхностей в зоне разрушения создаются условия для возникновения газового разряда, что приводит к рождению свободных электронов, которые, ускоряясь в поле разноименно заряженных поверхностей прорастающей трещины, дают при своем торможении РИ. Таким образом, механизм генерации РИ в данном случае аналогичен механизму генерации РИ в рентгеновских трубках [8]. Это подтверждается также и тем, что величина  $\Delta_{1/2}$  для характеристических линий, полученных при разрушении в этом интервале давлений, совпадает с величиной  $\Delta_{1/2}$  характеристических линий тех же элементов, полученных при облучении используемых образцов потоком электронов от электронной пушки.

В области низких давлений окружающей среды  $10^{-3}$ — $10^{-6}$  мм рт. ст. механизм генерации РИ имеет более сложный характер по сравнению с механизмом его генерации в области средних давлений. В области низких давлений появление свободных электронов в зоне развивающейся трещины обязано не протеканию газоразрядных процессов, а в большей мере эмиссии электронов высоких энергий [1] непосредственно с отрицательно заряженных участков свежесформированных поверхностей по механизму автоэлектронной эмиссии [9]. Эти электроны при торможении в противоположно заряженной стенке трещины также вызывают выход РИ. Однако такой механизм не объясняет уширения характеристических линий, экспоненциального вида частотного спектра тормозного излучения и появления дополнительных сателлитных линий. Поэтому торможение эмиттируемых с поверхности электронов в противоположной стенке развивающейся трещины, по-видимому, не является единственным источником генерации РИ.

Одним из возможных процессов, происходящих в зоне развивающейся трещины при разрушении в условиях низкого давления остаточных газов, может быть следующий. Под действием сильных электрических полей в зоне развивающейся трещины, эмиссии электронов высоких энергий и генерируемого при их торможении РИ происходит ионизация остаточных газов, окружающих прорастающую трещину, а также ионизация выделяющихся при разрушении газов [10] и летучих продуктов деструкции разрушаемого объекта [11]. Этот процесс приводит к зажиганию газового разряда между стенками развивающейся трещины, наличие которого подтверждается спектральным составом,

формой и длительностью импульсов свечения. В спектрах свечения обнаруживаются линии элементов окружающего газа, а также линии свечения, принадлежащие продуктам деструкции разрушаемого образца [2]. При этом форма и длительность  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  с импульсов свечения [1] также свидетельствует о протекании процесса газового разряда.

Вместе с тем в спектрах свечения, полученных при разрушении в условиях низкого давления остаточных газов, наблюдается ряд особенностей: очень высокая интенсивность светового излучения, резкое возрастание интенсивности излучения в УФ и ИК областях, присутствие в спектрах линий излучения возбужденных атомов разрушаемого образца и температурного излучения [2]. Кроме того, резко возрастает доля импульсов свечения с крутым передним фронтом, длительность которых не превышает  $10^{-7}$  с [12].

Естественно, что эти особенности типичным механизмом газового разряда объяснить не удается [2]. Поэтому в данном случае нам представляется возможным протекание следующего процесса. Под действием эмиссии электронов высоких энергий с положительно заряженной стенки прорастающей трещины происходит испарение вещества разрушаемого тела. Это положительно заряженное облако устремляется к отрицательно заряженной стенке трещины. Ввиду того что данная система электродов обладает очень малой индуктивностью, этот процесс может произойти достаточно быстро ( $\sim 10^{-7}$  с), что создает условия для осуществления пробоя между стенками развивающейся трещины по механизму вакуумной искры [13]. Если такой процесс осуществляется реально, то указанные особенности рентгеновского и светового излучений находят свое естественное объяснение, поскольку являются характерными и для излучательных процессов при развитии вакуумной искры.

В свете этих представлений генерация РИ при разрушении в условиях низкого давления остаточных газов обусловлена не только торможением эмиттируемых стеной трещины электронов, но и взаимодействием электронов и ионов в плазменных микрообразованиях типа вакуумной искры.

#### Литература

- [1] Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 280 с.
- [2] Майер К. // Механоэмиссия и механохимия твердых тел. Фрунзе: ИЛИМ, 1974. С. 20—28.
- [3] Ohara K., Naha T. // J. Appl. Polymer Sci. 1970. Vol. 14. N 8. P. 2079—2095.
- [4] Клюев В. А., Ревина Е. С., Анисимова В. И. и др. // Коллоидный журн. 1979. Т. 41. № 2. С. 348—351.
- [5] Гораздовский Т. Я. // Письма в ЖЭТФ. 1967. т. 5. Вып. 3. с. 78—82.
- [6] Клюев В. А., Липсон А. Г., Топоров Ю. П. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 18. С. 1135—1139.
- [7] Ардонович Л. А. Элементарная физика плазмы. М.: Атомиздат, 1966. 200 с.
- [8] Блохин М. А. Физика рентгеновских лучей. М.: Гостехиздат, 1953. 456 с.
- [9] Клюев В. А., Анисимова В. И., Топоров Ю. П. и др. // Коллоидный журн. 1978. Т. 40. № 2. С. 244—251.
- [10] Карасев В. В. // ЖЭТФ. 1959. Т. 34. Вып. 5. С. 1330—1331.
- [11] Пархин Л. С., Поздняков О. Р., Прут Э. В. и др. // Тез. докл. VII Всесоюзн. симпозию по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Ташкент: Укитуви, 1981. Т. 3. С. 97—101.
- [12] Беляев Л. М., Лобачев А. Н., Кузьмина И. П., Мартышев Ю. Н. // Механоэмиссия и механохимия твердых тел. Фрунзе: Илим, 1974. С. 123—128.
- [13] Корон Е. Д., Мейерович Б. Э., Сидельников Ю. В., Суворуков С. Т. // УФН. 1979. Т. 129. № 1. С. 87—113.

Институт физической химии  
АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
27 января 1987 г.  
В окончательной редакции  
11 ноября 1988 г.