

## РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ НАРУШЕНИИ АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА (ОБЗОР)

Ю.М. Евдокимов<sup>1✉</sup>, О.Л. Фиговский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России), Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4

<sup>2</sup>Израильская ассоциация изобретателей, Хайфа, Migdal HaEmek, Израиль

evdokur@mail.ru

Исследовано возникновение широкого спектра электромагнитного излучения при нарушении адгезионного контакта (видимое, радио, ИК, УФ, рентгеновского и акустического). Приведены результаты исследовательских работ, полученные сотрудниками научной школы академика Дерягина Б.В., включая собственные. Приведены новые результаты по оценке прочности адгезионного соединения для систем пленка-подложка, так как появилась возможность суждения о прочности адгезионных соединений по характеристикам электромагнитного излучения (период, амплитуда, частота и т. п.), а не только по данным «механических» подходов.

**Ключевые слова:** адгезия, нарушение адгезионного контакта, электромагнитное излучение

**Ссылка для цитирования:** Евдокимов Ю.М., Фиговский О.Л. Развитие исследований генерирования электромагнитных излучений при нарушении адгезионного контакта (обзор) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 4. С. 147–158. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-147-158

Длительное время оценка характеристик адгезии (прочность адгезионного соединения — ПАС) проводилась в основном с использованием «механических» подходов. В середине XX в. появились работы, показавшие, что расслаивание слюды на листочки, нарушение адгезионного контакта (АК) систем полимер — подложка сопровождается электризацией поверхностей отрыва, свечением в устье отрыва, эмиссией быстрых электронов [1, 2]. Впоследствии спектр электромагнитного излучения при нарушении АК и сопутствующих процессов (трении) «занял» почти всю область электромагнитных волн от гамма-излучения до радиоволн (включая рентгеновское, ультрафиолетовое (УФ) излучение, видимый свет, инфракрасное (ИК) излучение, радиоволновый диапазон и даже акустическое излучение, не относящееся к электромагнитному). К началу 2020-х годов генерирование широкого спектра электромагнитных излучений при нарушении АК (и трении) было обнаружено исследователями различных стран [1–48] — начиная от пионерских работ сотрудников всемирно известной адгезионной школы академика Б.В. Дерягина [1, 2, 4, 5, 13, 20–22, 25, 29, 37, 41, 48].

Так было дано начало новой области исследований, названной областью электроадгезионных явлений [7, 8, 13, 37, 48], связанной с процессами как образования, так и нарушения адгезионного

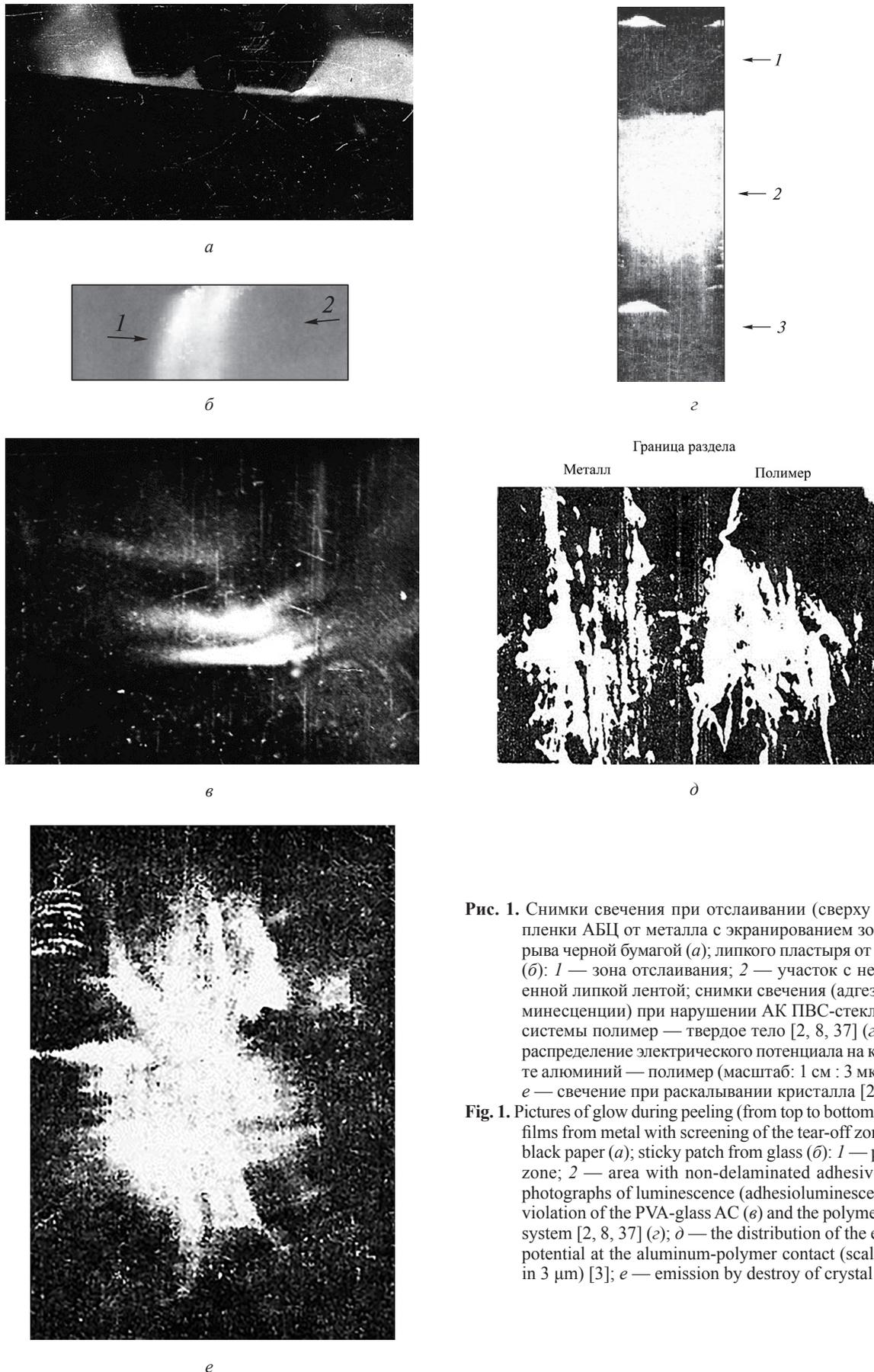
контакта. Исследования газоразрядных явлений в адгезии показали, что по интенсивности газоразрядных процессов при нарушении АК можно судить о ПАС.

### Цель работы

Цель работы — описание и анализ исследований различных авторов, включая собственные, по развитию исследований генерирования электромагнитных излучений при нарушении адгезионного контакта.

Первые исследования по рентгеновскому излучению при нарушении АК описаны Б.В. Дерягиным и соавт. еще в 1953 г. [1], однако они не имели широкого резонанса по причине новаторства, непривычного для того времени. Тем не менее пионерские работы Ю.М. Евдокимова с сотрудниками кафедры химии Московского лесотехнического института [4–6, 8, 20, 25, 37, 41, 45, 46, 48] об обнаружении радио- и акустического излучения (впоследствии и тормозного) наряду с адгезиолюминесценцией при разматывании скотчей (липких лент) и нарушении АК липких лент с подложками из стекла, металлов и полимеров, нашли быстрый отклик и были подтверждены учеными США [9] и некоторых других стран [3, 10, 17, 19, 21, 26, 29–31, 33–36] (рис. 1–4).

Генерирование электромагнитных колебаний в радиодиапазоне при нарушении АК изучалось на установке, которая позволяла определять работу ее отрыва, время начала и конца отрыва



**Рис. 1.** Снимки свечения при отслаивании (сверху вниз): пленки АБЦ от металла с экранированием зоны отрыва черной бумагой (а); липкого пластыря от стекла (б): 1 — зона отслаивания; 2 — участок с неотслоенной липкой лентой; снимки свечения (адгезиолуминесценции) при нарушении АК ПВС-стекла (в) и системы полимер — твердое тело [2, 8, 37] (г); д — распределение электрического потенциала на контакте алюминий — полимер (масштаб: 1 см : 3 мкм) [3]; е — свечение при раскалывании кристалла [2]

**Fig. 1.** Pictures of glow during peeling (from top to bottom): ABC films from metal with screening of the tear-off zone with black paper (a); sticky patch from glass (b): 1 — peeling zone; 2 — area with non-delaminated adhesive tape; photographs of luminescence (adhesioluminescence) in violation of the PVA-glass AC (в) and the polymer-solid system [2, 8, 37] (г); д — the distribution of the electric potential at the aluminum-polymer contact (scale 1 cm in 3  $\mu$ m) [3]; e — emission by destroy of crystal [2]

липкой ленты при расслаивании (отслаивании) от твердых подложек и определять частоту излучения, форму радиоимпульсов, а также оценивать их длительность. Эксперименты проводились в атмосферных условиях. Детектором электромагнитного излучения служила телескопическая антенна радиоприемного устройства длиной 1 м, расположенная в 1,5 м от устья отрыва. После детектирования и усиления сигналы, принятые антенной, усиливались, регистрировались на осциллографе, с экрана которого проводилось фотографирование. Параллельно они записывались на магнитную ленту для последующего воспроизведения на осциллографе. Исследования проводилось в коротковолновом диапазоне на частотах свыше 1 МГц (рис. 7, см. рис. 2–4) [25].

Показано, что радиоизлучение носит импульсный характер. В появлении радиоимпульса определенное значение имеет скорость отслаивания, которая определяет механизм нейтрализации двойного электрического слоя, возникшего в период пленкообразования. При постоянной скорости отслаивания интенсивность радиоизлучения имеет регулярный характер (см. рис. 3) и постоянство периода  $T$  (участок 3). Это свидетельствует, что при изменении амплитуды разрядных токов динамическое сопротивление не изменяется. Разряды происходят на микроучастках отслаивающейся пленки, где напряженность поля достигает критического значения.

По данным исследований [8, 37] (см. рис. 5) касательно системы скотч — твердое тело, была оценена длина элементарного участка отслаивания (около 300 мкм) — важнейшая характеристика адгезии, что находится в хорошем согласии с вычисленными по иным характеристикам [5].

Во всех случаях радиоизлучение (см. рис. 2) сопровождается излучением видимого света, регистрируемого ФЭУ на первом канале осциллографа, и звуковыми колебаниями, записываемыми через микрофон (см. рис. 2, 4). При средней скорости отслаивания (0,1...1,0 см/с) время появления световых и радиоимпульсов совпадает (см. рис. 2) [25], что указывает на проявление газоразрядных процессов при нарушении АК. Это подтверждается и снимком стримера, полученном при разматывании липкой ленты КЛТ с высокой скоростью вблизи от фотопленки (рис. 8) [8].

Синхронное возникновение рентгеновского (X-ray), оптического, радио-, инфракрасного (ИК), ультрафиолетового (УФ) и акустического излучений (АИ) [1, 2, 4–9, 13, 20–25, 29, 37] однозначно служит доказательством развития газоразрядных процессов в устье отрыва при нарушении АК, а также показывает его индикацию, согласуется с положениями электронной и электромагнитной теорий адгезии [1, 15].

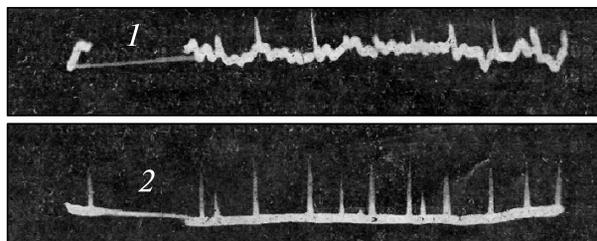


Рис. 2. Разматывание (расслаивание) липкой ленты на лавсановой основе: 1 — радиоизлучение, принятое антенной; 2 — свечение, зарегистрированное фотозумножителем (ФЭУ)

Fig. 2. Unwinding (delamination) of the adhesive tape based on lavsan: 1 — radio emission received by the antenna; 2 — light emission registered by a photomultiplier tube (PMT)

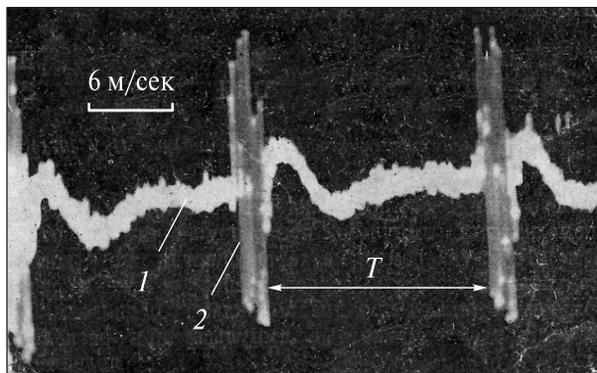


Рис. 3. Осциллограмма радиоизлучения при отслаивании липкой ленты КЛТ от силикатного стекла со скоростью 1 м/с (частота приема 10 МГц); развертка запускалась от генерируемого радиоимпульса

Fig. 3. Oscillogram of radio emission by peel adhesive tape of KLT from silicate glass at a speed of 1 m/s; receive frequency 10 MHz

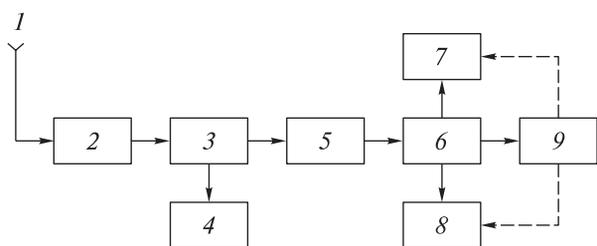
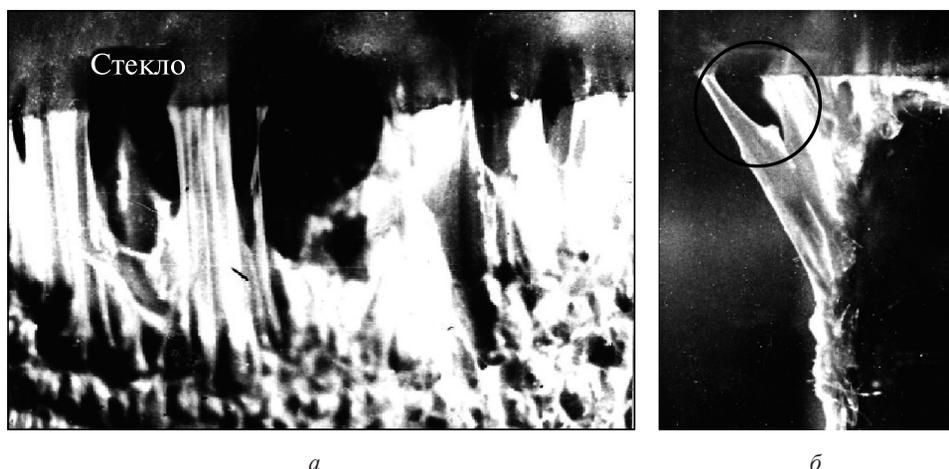


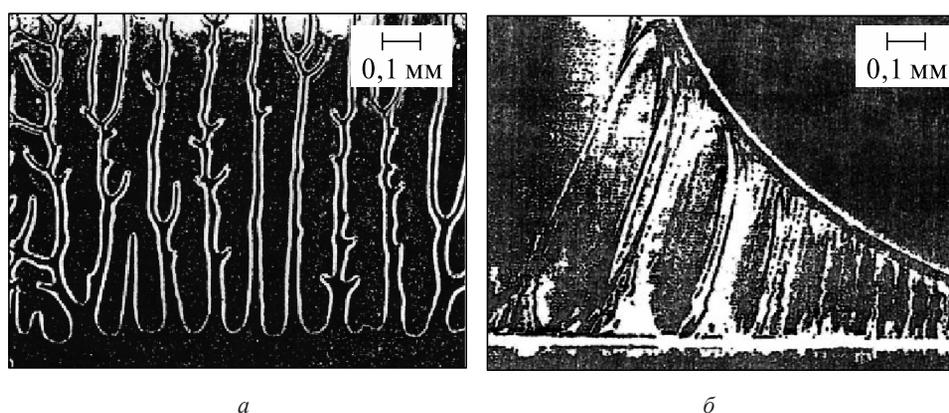
Рис. 4. Схема регистрации электромагнитного излучения при нарушении адгезионного контакта двух твердых тел: 1 — приемная антенна; 2 — входные цепи; 3 — смеситель; 4 — гетеродин; 5 — усилитель промежуточной частоты; 6 — детектор; 7, 8 — осциллографы (импульсный или шлейфовый); 9 — магнитофон (Grundig TK-46)

Fig. 4. Scheme for registration of electromagnetic radiation by breach of the AC (adhesion contact) of two solid bodies: 1 — receiving antenna; 2 — input circuits; 3 — mixer; 4 — local oscillator (geterodin); 5 — intermediate frequency amplifier; 6 — detector; 7, 8 — oscilloscopes (pulse or loop); 9 — tape recorder (Grundig TK-46)



**Рис. 5.** Тяжи, образующиеся в устье отслаивания при отслаивании липкого медицинского пластыря на тканевой основе от стекла (*a*) и сбоку (*б*)

**Fig. 5.** Strands formed at the mouth of the peeling by peeling of medical scotch (tissue-based medical plaster) from glass (*a*) and from the side (*б*)



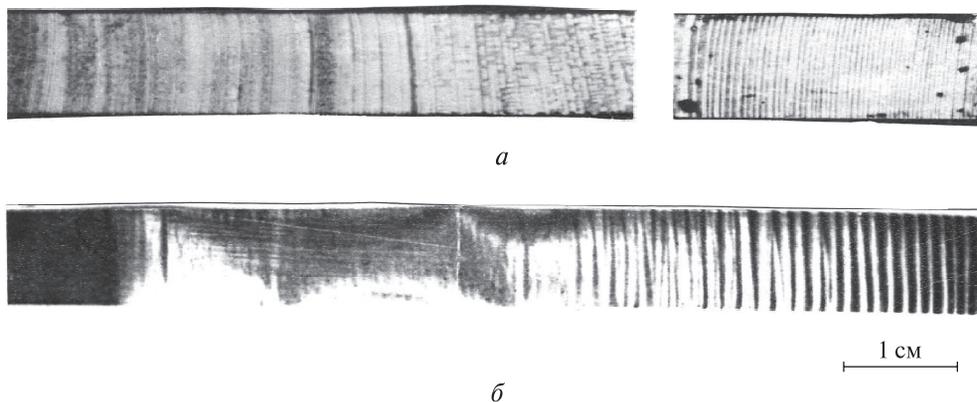
**Рис. 6.** Морфология отслаивания липкой ленты сбоку (*a*) и в устье отслаивания (*б*) и [39]

**Fig. 6.** Peeling morphology of PSA-scotch side view (*a*) and bottom view (*б*) [39]

Во всех случаях нарушение АК сопровождается электризацией поверхностей отрыва (отслаивания), эмиссией электронов высокой энергии, электропробойными разрядами окружающей газовой среды и другими процессами, присущими природным газоразрядным явлениям, например молнии. При разряде молнии можно наблюдать вспышки света, радиопомехи, звуковое сопровождение и генерирование рентгеновского излучения интенсивностью до 250 кэВ [12].

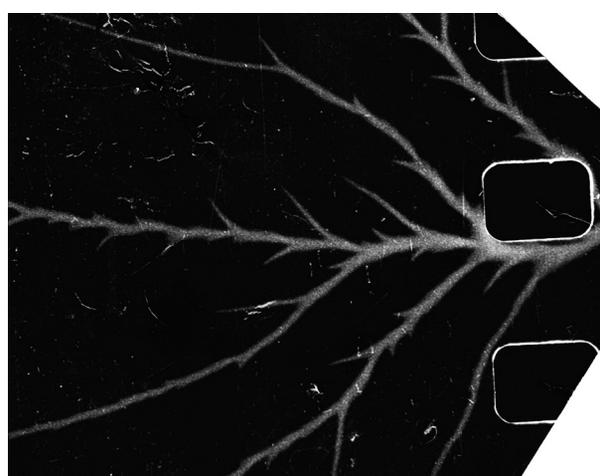
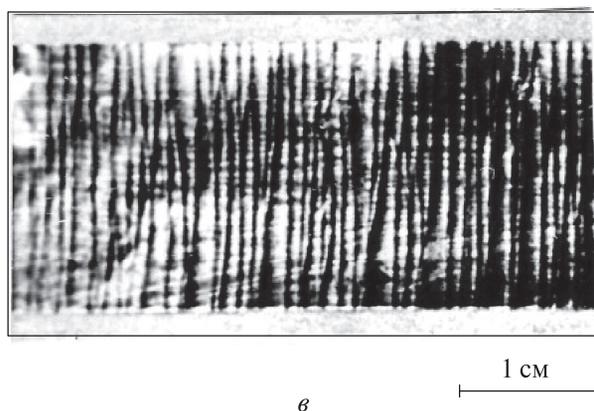
Наши эксперименты показали [4, 5], что количество импульсов излучения и количество гофр на единицу длины отрываемой пленки одинаковое. Разрядный промежуток  $h$ , оцененный по «слепкам» гофр (см. рис. 5, 7) и с использованием закона Пашена [5] по порядку совпадают. К примеру, значение  $h$  в микрометрах для системы стекло — ПВХ (АВЦ), оцененные на основе профилограмм и с помощью кривой Пашена оказались соответственно в пределах 3...7 мкм и 2,1...2,3 мкм.

Интенсивность свечения, радиоизлучения и акустических колебаний, так же, как и ПАС, зависят от природы пленки и подложки адгезионной пары, скорости нарушения АК, рода и давления окружающей газовой среды. Предложен метод расчета электрических характеристик адгезии (поверхностной плотности электризации, разрядного потенциала, разрядного промежутка и напряженности поля в зазоре) [37], имеющий важное практическое значение в связи с проблемой статической электризации в технологических процессах. Оцененная нами [4] с помощью уравнения Пойнтинга мощность радиоизлучения оказалась порядка  $3,3 \times 10^{-13} \dots 13,2 \times 10^{-11}$  кВт, что свидетельствует о контроле радиоизлучения при нарушении АК как высокочувствительном методе оценки ПАС. При нарушении АК в вакууме наблюдаются колебания, соответствующей эмиссии механоэлектронов [1]. Характер этих колебаний весьма сходен и может



**Рис. 7.** Автографы гофр — складок на поверхности, оставленные липкими лентами марок МТТ и FT [11]: *a* — при отслаивании их от поверхности твердого тела с возрастающей слева направо скоростью; *б* — поверхность стальной фольги после отслаивания ее от липкой ленты КЛТ под углом 180°; *в* — гофры — складки на алюминиевой фольге толщиной 15 мкм после отслаивания от липкой ленты под углом 90° при постоянной скорости отслаивания [8, 11, 37]

**Fig. 7.** Autographs of corrugations — folds (wrinkle) or strap-folds on the surface (from top to bottom), left by adhesive tapes of MTT and FT brands [11] when peeling them from the surface of a solid body with increasing (from left to right) speed (*a*); the same picture with the surface of the steel foil (*b*) after peeling it off the KLT adhesive tape at an angle of 180 degrees; corrugations — folds on aluminum foil 15 μm thick after peeling from adhesive tape at an angle of 90 degrees at a constant peeling rate (*e*) [8, 11, 37]



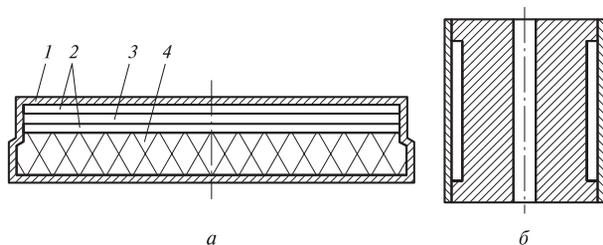
**Рис. 8.** Электрический разряд (стример), оставшийся на фотопленке при разматывании вблизи нее липкой ленты КЛТ на лавсановой основе

**Fig. 8.** Electric discharge (streamer) remaining on the foto-film by peeling near it of the adhesive tape KLT on lavsan based

быть сопоставимым с колебаниями механического напряжения при отслаивании (отрыве) пленок полимеров и осциллограммами радио- и видимого излучения, из чего следует, что процесс нарушения АК и все явления, его сопровождающие, носят колебательный характер (отслаивание пленок от подложек происходит рывками, что отмечено всеми авторами, занимающимися подобными исследованиями [1, 4, 13, 25, 37, 43, 44, 46]).

Через некоторое время американские исследователи [9] полностью подтвердили данные, полученные в ходе наших пионерских исследований, проведенных в СССР в 1967–1975 гг. [4, 5, 13, 25, 37] по обнаружению светового, радио- и акустического излучений при разматывании липких лент и нарушении АК иных систем полимер — субстрат. Обнаружено и рентгеновское излучение при разматывании липких лент (рис. 9, 10) [9, 13, 20, 29] с высокой энергией (десятки кэВ), что позволило американским коллегам найти коммерческое приложение обнаруженному эффекту — как источника рентгеновской фотографии в устройствах переносных рентгеновских аппаратов. Исследователи СССР [13] показали

принципиальную возможность использования источника рентгеновских лучей при разматывании липких лент для дефектоскопии тонких цилиндрических объектов.



**Рис. 9.** Схема приспособления для обнаружения проникающего излучения при нарушении адгезионного контакта и в процессе трения качения: *a* — диск (цилиндрическая коробка): 1 — крышка; 2 — черная бумага; 3 — пленка; 4 — резина; *б* — ролик с заложенной внутри рентгеновской пленкой [13]

**Fig. 9.** Scheme of a device for detecting penetrating radiation by breach of the adhesive contact (AC) and in the process of rolling friction: *a* — disk (cylindrical box): 1 — cover; 2 — black paper; 3 — film; 4 — rubber; *б* — roller with X-ray film embedded inside [13]

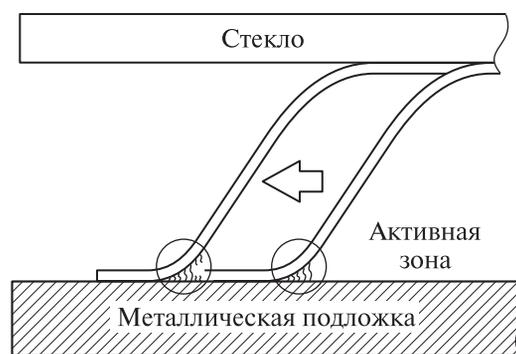


**Рис. 10.** Схема аппаратуры для изучения высоко-энергетической эмиссии при отслаивании — разматывании (rotation) с рулона липких лент в вакууме с помощью двигателя (motor) с оценкой свечения с использованием индуктора (inductor) и рентгеновского излучения с использованием X-лучевого детектора (X-ray detector) [9]

**Fig. 10.** Scheme of apparatus for studying high-energy emission from peeling tape. Rotation from a roll of adhesive tapes in a vacuum using a motor with an estimate of the glow using an inductor and X-ray radiation using an x-beam detector (X-ray detector) [9]

Нам удалось провести качественное наблюдение ИК-излучения при разматывании липких лент с большой скоростью (рывком) перед чувствительным элементом тепловизора и УФ-излучения [20].

К другим результатам, изложенным в работе [9], можно отнести наблюдение и исследование деформационных процессов при разматывании липких лент с различной скоростью отслаивания (рис. 11–13, см. рис. 5, 6,) [6, 37, 39, 43–46], которые подтвердили необходимость проверки данных.



**Рис. 11.** Схема развития тяжей в активной зоне (active zone) до образования новой поверхности при нарушении АК в системе стекло (glass) — подложка из металла (metal substrate) [44]

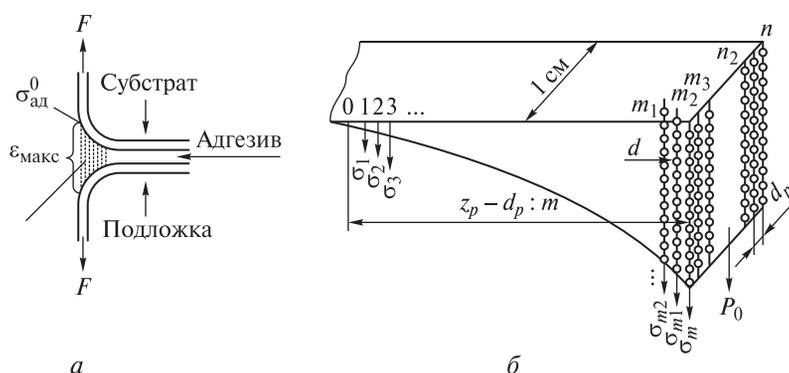
**Fig. 11.** Scheme of the development of strands in the active zone until the formation of a new surface when the AC is broken in the glass — metal substrate system [44]

Прочность адгезионного соединения зависит не только от специфических взаимодействий на границе раздела фаз адгезив — подложка (субстрат), но и от деформационных характеристик, как адгезива, так и субстрата [3, 6–9, 37, 43–46]. Иногда вклад деформационной составляющей в общую ПАС довольно высокий.

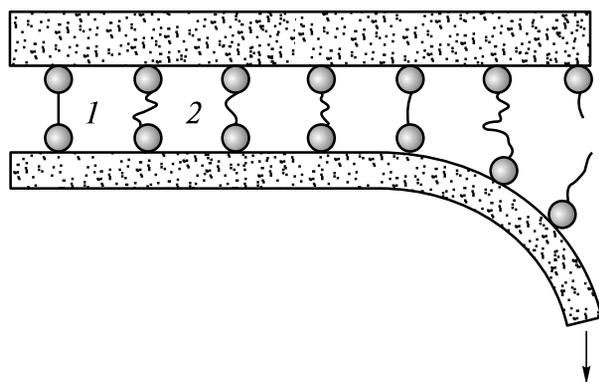
Нами доказана применимость закона Пашена к газоразрядным явлениям, наблюдающимся при нарушении АК в области повышенного давления (101, 325...901, 925 кПа) в окружающей газовой среде [5] (при пониженном давлении сказанное экспериментально подтверждено ранее работами Б.В. Дерягина и соавт. [1, 2]).

Относительно акустического излучения (рис. 14) [8, 46] зарубежные исследователи предлагают снижение шума, производимого разматывающимися лентами на производстве, за счет радикального уменьшения времени и перехода процесса отделения клейкой ленты от поверхности в более равномерный режим (не рывками). Мы предлагали судить по акустическому излучению о надежности работы лопаток авиадвигателей, так как акустическое излучение проявляет себя еще до разрушения материалов (в период образования микродефектов и микротрещин) [8, 20]. Есть и экзотический метод суждения о поражении древесины жуками-древоточцами по характерным звукам-щелчкам, издаваемыми жучками при перегрызании волокон и массива древесины (нарушение когезии древесных волокон и АК древесных структур).

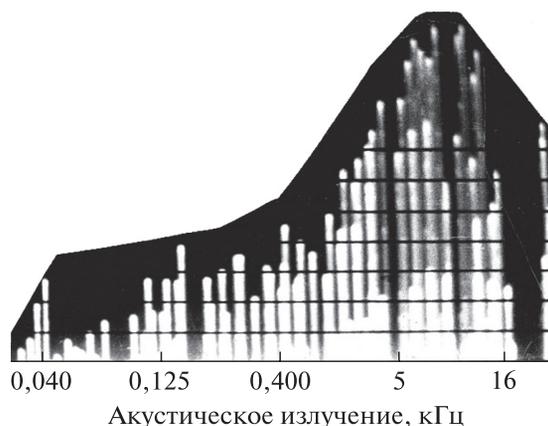
Из последних данных [47] следует, что некоторые металлы и фольга «помнят» о бывшем деформационном или температурном воздействии. Например, складки на листе бумаги «помнят» о том, как был сложен лист (или скомкан). При исследованиях адгезионных явлений аналогом



**Рис. 12.** Схема зоны деформации адгезива при нарушении АК расслаиванием по А.А. Чалых (а) [43] и по Н.И. Москвитину (б) [45]  
**Fig. 12.** Scheme of the zone of deformation of the adhesive in case of violation of the AC by delamination according to A.A. Chalykh (a) [43] and according to N.I. Moskvitin (b) [45]



**Рис. 13.** Модель отслаивания с учетом разнодлинных адгезионных связей: 1 — короткие связи (рвутся в первую очередь); 2 — длинные связи (вначале деформируются, впоследствии разрушаются) [6]  
**Fig. 13.** Peeling model taking into account adhesive bonds of different lengths: 1 — short bonds (break first); 2 — long bonds (at first they are deformed, then they are destroyed) [6]

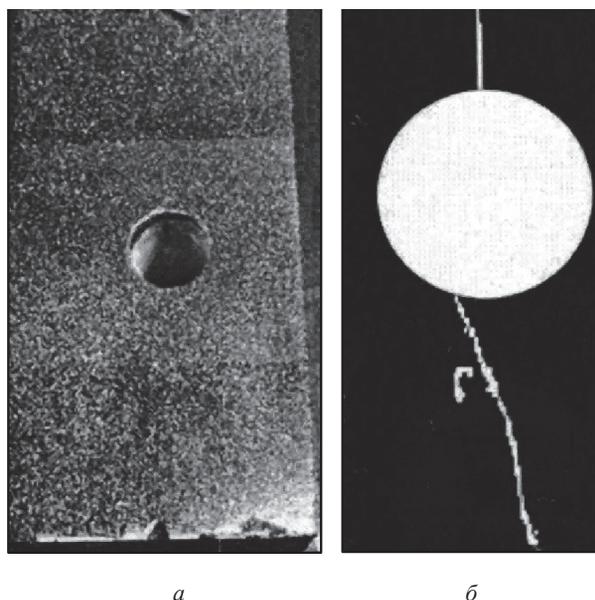


**Рис. 14.** Спектр акустического излучения при нарушении АК липкая лента — силикатное стекло при скорости отслаивания 0,09 м/сек (40 Гц...20 кГц; представлена часть спектра) [46]  
**Fig. 14.** Acoustic radiation spectrum in case of (breach) violation of AC adhesive tape—silicate glass at a peeling speed of 0,09 m/s (40 Hz–20 kHz; the illustration shows part of the spectrum) [46]

могут служить гофрированные поверхности алюминиевой или стальной фольги (см. рис. 7), получающиеся после нарушения АК в системе фольга металла — полимер. Появляется возможность узнать предысторию твердого тела (которая нам не была известна), что открывает новые возможности для диагностики и программирования материалов.

В связи с изложенным выше, появились новые возможности оценки характеристик АК по электромагнитному излучению [4, 7–10, 13, 20], проведения акустико-эмиссионной диагностики методом неразрушающего контроля, использования результатов исследований как метода определения технического состояния объекта в целях оценки его безопасности и прогнозирова-

ния ресурса. Кроме этого, акустико-эмиссионный контроль [10] удобен при оценке роста дефектов при развитии трещины или зоны пластической деформации, испытании на усталость, ползучесть, при этом источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник. Кроме этого, акустико-эмиссионный метод обнаруживает движение дефекта, т. е. развивающиеся наиболее опасные дефекты (например, появление трещин в лопатках авиадвигателей до разрушительных последствий). Благодаря концентрации напряжений в вершине дефектов наблюдается генерирование сигнала эмиссии при росте нагрузки и появляется возможность судить об усталостном коррозионном растрескивании, водородном охрупчивании и т. п.



**Рис. 15.** Микротрещины в напряженном окрашенном цементном блоке едва заметны при обычном освещении (а), однако отчетливо видны на изображении в ближнем ИК-диапазоне (б) [47]

**Fig. 15.** Microcracks in a stressed colored cement block are hardly visible under normal illumination (a), but clearly visible in the image in the near IR range (b) [47]

Данные экспериментов могут использоваться в следующих случаях:

при исследовании прочностных свойств композитов, обработанных ультразвуком;

регистрации накопленных повреждений при деформации композитов и покрытий на основе регистрации сигналов акустико-эмиссионного метода;

оценке электризации трещин и электромагнитных предвестников разрушения горных пород, несущих элементов пролетных строений железнодорожных мостов;

суждении о разрушении образцов из углерод-углеродного композита по данным акустической эмиссии [17, 19, 23, 26, 27, 31, 36, 42, 46].

Сотрудниками Университета Райса (Rice University) и Кувейтского института научных исследований (KISR) было обнаружено [47], что невидимые визуально микротрещины (рис. 15, а), отчетливо становятся видимыми (рис. 15, б) в ближнем ИК-диапазоне. Оказалось, что кристаллы кремния в портландцементе излучают флуоресценцию в ближнем ИК-диапазоне при освещении видимым светом, что позволяет выявить ранние повреждения (микротрещины) в бетоне или цементе при нанесении тонкого слоя непрозрачной краски на бетон. При сканировании в ближнем ИК-диапазоне неповрежденный бетон кажется черным, а светящиеся лучики выявляют мельчайшие трещины (см. рис. 15, б).

## Выводы

Проанализирован значительный материал (с середины XX в. по настоящее время) по генерированию электромагнитных излучений при нарушении адгезионного контакта твердых тел. Показано, что о прочности адгезионного соединения можно судить не только на основе «механического» подхода, но и по характеристикам электромагнитных излучений, сопровождающих нарушение адгезионного контакта, что представляется полезным при изучении адгезионных явлений.

## Список литературы

- [1] Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 279 с.
- [2] Selected works of B. V. Derjaguin. Vol. 1: Surface forces in Thin Films and Disperse Systems, Vol. 1. Editor-in-chief: S.G. Davison. Pergamon Press, New York-Oxford-Seoul-Tokyo, no. 1–4, May–August 1992, pp. 1–465.
- [3] Bischof C., Possart W. Adhesion. Theoretische und experimentelle // Drundlagen, Academic Verlag, Berlin, 1983, 272 p.
- [4] Тюрикова Л.А., Евдокимов Ю.М., Москвитин Н.И., Авербух Б.Г. Генерирование электромагнитных волн при нарушении адгезионной связи // Тезисы докладов и сообщений II Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Фрунзе: б. и., 1969. С. 13–14.
- [5] Тюрикова Л.А., Евдокимов Ю.М., Москвитин Н.И., Кротова Н.А. Исследование применимости закона Пашена к адгезии полимеров в условиях повышенного давления в окружающей газовой среде // Докл. АН СССР, 1969. Т. 184. № 3. С. 658–660.
- [6] Kestelman V.N., Negmatov S.S., Evdokimov Yu.M. New methods of increasing Adhesive bond Strength // Int. J. of Adhesion and Adhesives, 1988, v. 8, no. 3, pp. 171–174.
- [7] Khrustalev Yu.A. Electric Phenomena of the rupturing of adhesive contact and failure of solids: development stages from gas discharge to cold nuclear fusion // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1993, v. 79, pp. 51–63.
- [8] Евдокимов Ю.М. Адгезия. От макро- и микроуровня к наносистемам. М.: МГУЛ, 2011. 208 с.
- [9] Camara C.G., Escobar J.V., Hird J.R., Putterman S.J. Correlation between nanosecond X-ray flashes and stick-slip friction in peeling tape // Nature, 2008, no. 8, pp. 1089–1092. DOI: 10.1038/nature07378
- [10] Pollok A. Acoustic emission testing. Metals Handbook. AST International, 1989, v. 17, pp. 278–294.
- [11] Donald D.K. Contact Electrification of Insulators and its Relevance to Electrets // J. of the Electrochemical Society, 1968, v. 115, no. 3, pp. 270–272.
- [12] Гуревич А.В., Зыкин К.П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН, 2001. № 171. С. 1177–1199.
- [13] Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Князева Н.П. Возникновение проникающего излучения при нарушении адгезионного контакта // Докл. АН СССР, 1974. Т. 215. № 5. С. 1078–1080.
- [14] Клементьев Н.М. Термодинамика трения. Воронеж: б. и., 1971. 306 с.

- [15] Ениколопов Н.С., Негматов С.С., Евдокимов Ю.М. Электромагнитная природа адгезии // Тезисы докладов VII Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Т. 1. 24–26 октября 1979 г. Ташкент: ТашПИ, 1981. С. 8–12.
- [16] Kendal K. Thin –film peeling – the elastic term // *J. Phys.* D 8, 1975, pp. 1449–1453.
- [17] Андрейкин А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. Киев: Наукова думка, 1989. 137 с.
- [18] Евдокимов Ю.М., Фиговский О.Л., Кестельман В.Н. Электроадгезия — итог (открытие, развитие, перспективы) // Сб. тезисов X Ежегодной Юбилейной конференции Нанотехнологического общества России, 26–28 марта 2019. М.: Государственная корпорация «Российская корпорация нанотехнологий», 2019. С. 34–36.
- [19] Чернова В.В. Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектов на ранней стадии развития в изделиях из композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, Сибирский госуниверситет путей сообщения, 2016. 144 с.
- [20] Евдокимов Ю.М. Рентгеновское излучение с ручным приводом // Независимая газета. Приложение: НГ-НАУКА, 11. 03. 2009. С. 13.
- [21] Мамбетов Д.М. Электрические явления при адгезионном и когезионном разрушении твердых тел / под ред. Н.А. Кротовой. Фрунзе: Мектеп, 1973. 135 с.
- [22] Губайдуллин З.Х. Исследование свечения и электрических процессов, сопровождающих разрушение кристаллогидратов и структурные преобразования продуктов дегидратации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва. Институт физической химии АН СССР, 1975. 21 с.
- [23] Панин С.В., Бурков М.В., Бяков А.В., Любутин П.С. Комбинированный метод исследования деформации и разрушения образцов из углерод-углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии // Вестник науки Сибири, 2012. № 4 (5). С. 120–138.
- [24] Мусуралиев Т.М. Исследование влияния различных факторов на газоразрядные явления при отрыве пленок полимеров от твердых подложек: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Бишкек, Институт физики НАН Кыргызской республики, 1996. 21 с.
- [25] Тюрикова Л.А., Авербух Б.Г., Москвитин Н.И., Кротова Н.А. Исследование параметров радиоизлучения при нарушении адгезии полимер — твердое тело // ДАН СССР, 1971. Т. 201. № 4. С. 833–835.
- [26] Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. М.: Стандарты, 1987. 218 с.
- [27] Wei Y., Hutchinson J.W. Interface strength, work of adhesion and plasticity in peel test // *Intern. J. of Fracture*, 1998, v. 93, pp. 315–333.
- [28] Bull S.J. Failure modes in scratch adhesion testing // *Surfaces and Coat. Technol.*, 1991, v. 50, no. 1, pp. 25–32.
- [29] Kluev V.A., Toporov Yu.P., Aliev A.D., Chalykh A.D., Lipson A.G. The effect of air pressure on the parameters of X-ray emission accompanying adhesive and cohesive breaking of solids // *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1989, v. 34, pp. 361–364.
- [30] Хайнике Г. Трибохимия. М.: Мир, 1987. 584 с.
- [31] Sodomka L. *Mechanoluminescence*. Praha: Vydala Academia, 1985, 225 p
- [32] Kestelman V., Pinchuk L., Goldade V. *Electrets in Engineering. Fundamentals and applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London: Springer Science+Business Media New York, 2000, 281 p.
- [33] Воробьев А.А., Заводовская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // Докл. АН СССР, 1975. Т. 220. № 1. С. 82–83.
- [34] Коровкин М.В. Электромагнитные эффекты в радиодиапазоне, связанные с динамикой радиационных дефектов в диэлектриках: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, ТПИ, 1998. 308 с.
- [35] Thiessen P.A., Meyer K., Heinicke G. *Grundlagen der Tribochemie*. Berlin: Akad. Verlag, 1967, 194 p.
- [36] Лунегова Е.М. Анализ закономерностей накопления повреждений при деформировании углеродных композитов и керамических покрытий на основе регистрации сигналов акустической эмиссии: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, Пермский Национальный исследовательский политехнический университет, 2021. 200 с.
- [37] Евдокимов Ю.М. Исследование электроадгезионных явлений и возможности создания и нарушения адгезионного контакта при наложении внешнего электрического поля: дис. ... канд. хим. наук, Москва, МТИЛП, 1968. 137 с.
- [38] Evdokimov J.M., Kestelman V.N., Schindel-Bidinelli E. *Electroadhesive Joints* // Abstract book Jnt. Adhesion Symposium JAS 94, The adhesion society of Japan, Tokyo, November 06–10, 1994, pp. 261–262.
- [39] Yamagishi T., Node S., Chishima Y., Fukuzawa V. Basic research on the mechanism of pressure sensitive Adhesive tape, no. 1–2, 1994, pp. 177–180.
- [40] Almataev T.O., Almataev N.T. Studies of tribotechnical properties of composite polymeric materials of machine designation // *Scientific Bulletin. Physical and mathematical Research*, 2019, Issue 2, v. 1, Article 6, pp. 53–57.
- [41] Jewdokimow Ju.M. Der Einflub auberer elektrischer und magnetischer Felder auf die Adhasion // *Kurzfassungen 3/ Symposium fur Triboemission und Tribochemie, Kammer der Technik, Berlin, DDR*, pp. 26–27.
- [42] De R., Ananthakrishna G. Dynamics of the pell front and the nature of acoustic emission during peeling of an adhesive tape // *Phys. Rev. Lett.*, 2006, v. 97 (16), pp. 165503–165506.
- [43] Чалых А.А., Герасимов В.К. Влияние деформационных характеристик полимеров на их адгезионную способность // *Известия вузов. Химия и химическая технология*, 2003. Т. 46. Вып. 1. С. 43–46.
- [44] Napolitano M.J., Chudnovsky A., Moet A. The constrained blister test for the energy of interfacial adhesion // *J. Adh. Sci Technol.*, 1988, t. 2, no 4, p. 311–323.
- [45] Москвитин Н.И. Склеивание полимеров. М.: Лесная пром-сть, 1968. 304 с.
- [46] Евдокимов Ю.М., Грушева Т.Г. Липкие ленты в научных исследованиях // *НБИКС-НТ*, 2020. № 10 (4). С. 42–50.
- [47] Keim N.C., Medina D. Mechanical annealing and memories in a disordered solid // *Science advanced*, 2022, v. 8, iss. 40. DOI:10.1126/sciadv.abo1614
- [48] Евдокимов Ю.М., Сулименко В.А., Мещеряков А.В., Русских Д.В. История создания электроадгезионных соединений // *Лесное Вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. № 1. С. 107–113.  
DOI :10.18698/2542-1468-2023-1-107-113

## Сведения об авторах

**Евдокимов Юрий Михайлович** <sup>✉</sup> — канд. хим. наук, профессор кафедры процессов горения Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, [evdokur@mail.ru](mailto:evdokur@mail.ru)

**Фиговский Олег Львович** — д-р техн. наук, Президент Израильской ассоциации изобретателей, Хайфа, Израиль, [figovsky@gmail.com](mailto:figovsky@gmail.com)

Поступила в редакцию 19.12.2022.

Одобрено после рецензирования 26.12.2022.

Принята к публикации 14.06.2023.

## RESEARCH DEVELOPMENT BY GENERATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION UNDER ADHESION CONTACT BREACH (REVIEW)

Yu.M. Evdokimov<sup>1✉</sup>, O.L. Figovskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Fire Academy of EMERCOIM of Russia, 4, Boris Galushkin st., 129366, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Israeli Inventors Association, Haifa, Migdal HaEmek, Israel

[evdokur@mail.ru](mailto:evdokur@mail.ru)

The emergence of a wide range of electromagnetic radiation at failure of adhesive contact (visible, radio, IR, UV, X-ray and acoustic) is investigated. The results of research works obtained by employees of The Academician B.V. Deryagin scientific school, including his own, are presented. New results on assessment of adhesive bond strength for film-substrate systems are presented, as it became possible to judge the strength of adhesive bonds by electromagnetic radiation characteristics (period, amplitude, frequency, etc.) and not only by «mechanical» approaches.

**Keywords:** adhesion, breach of adhesion contact, electromagnetic radiation

**Suggested citation:** Evdokimov Yu.M., Figovskiy O.L. *Razvitie issledovaniy generirovaniya elektromagnitnykh izlucheni pri narushenii adgezionnogo kontakta (obzor)* [Research development by generation of electromagnetic radiation under adhesion contact breach (review)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 147–158. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-147-158

## References

- [1] Deryagin B.V., Krotova N.A., Smilga V.P. *Adgeziya tverdykh tel* [Adhesion of solids]. Moscow: Nauka, 1973, 279 p.
- [2] Selected works of B.V. Derjaguin. Vol. 1: Surface forces in Thin Films and Disperse Systems, Vol. 1. Editor-in-chief: S.G. Davison. Pergamon Press, New York-Oxford-Seoul-Tokyo, no. 1–4, May-August 1992, pp. 1–465.
- [3] Bischof C., Possart W. Adhasion. Theoretische und experimentelle. Drundlagen, Academie Verlag, Berlin, 1983, 272 p.
- [4] Tyurikova L.A., Evdokimov Yu.M., Moskvitin N.I., Averbukh B.G. *Generirovanie elektromagnitnykh voln pri narushenii adgezionnoy svyazi* [Generation of electromagnetic waves in violation of adhesive bond]. *Tezisy dokladov i soobshcheniy II Vsesoyuznogo simpoziuma po mekhanoemissii i mekhanokhimii tverdykh tel* [Abstracts of reports and communications of the II All-Union Symposium on mechano-emission and mechanochemistry of solids]. Frunze, 1969, pp. 13–14.
- [5] Tyurikova L.A., Evdokimov Yu.M., Moskvitin N.I., Krotova N.A. *Issledovanie primenimosti zakona Pashena k adgezii polimerov v usloviyakh povyshennogo davleniya v okruzhayushchey gazovoy srede* [Investigation of the applicability of Paschen's law to the adhesion of polymers under conditions of high pressure in an ambient gaseous medium]. *DAN SSSR*, 1969, v. 184, no. 3, pp. 658–660.
- [6] Kestelman V.N., Negmatov S.S., Evdokimov Yu.M. New methods of increasing Adhesive bond Strength. *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, 1988, v. 8, no. 3, pp. 171–174.
- [7] Khrustalev Yu.A. Electric Phenomena of the rupturing of adhesive contact and failure of solids: development stages from gas discharge to cold nuclear fusion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1993, v. 79, pp. 51–63.
- [8] Evdokimov Yu.M. *Adgeziya. Ot makro- i mikrourovnya k nanosistemam* [Adhesion. From macro- and microlevel to nanosystems]. Moscow: MSFU, 2011, 208 p.
- [9] Camara C.G., Escobar J.V., Hird J.R., Putterman S.J. Correlation between nanosecond X-ray flashes and stick-slip friction in peeling tape. *Nature*, 2008, no. 8, pp. 1089–1092. DOI: 10.1038/nature07378
- [10] Pollok A. Acoustic emission testing. *Metals Handbook*. AST International, 1989, v. 17, pp. 278–294.
- [11] Donald D.K. Contact Electrification of Insulators and its Relevance to Electrets. *J. of the Electrochemical Society*, 1968, v. 115, no. 3, pp. 270–272.
- [12] Gurevich A.V., Zykin K.P. *Proboi na ubegayushchikh elektronakh i elektricheskie razryady vo vremya grozy* [Runaway breakdown and electrical discharges during a thunderstorm], *UFN*, 2001, no. 171, pp. 1177–1199.
- [13] Deryagin B.V., Krotova N.A., Knyazeva N.P. *Vozniknovenie pronikayushchego izlucheniya pri narushenii adgezionnogo kontakta* [Occurrence of penetrating radiation when adhesive contact is broken]. *DAN SSSR*, 1974, v. 215, no. 5, pp. 1078–1080.

- [14] Klement'ev N.M. *Termodinamika treniya* [Thermodynamics of friction]. Voronezh, 1971, 306 p.
- [15] Enikolopov N.S., Negmatov S.S., Evdokimov Yu.M. *Elektromagnitnaya priroda adgezii* [Electromagnetic nature of adhesion]. Tezisy dokladov VII Vsesoyuznogo simpoziuma po mekhanoemissii i mekhanokhimii tverdykh tel [Abstracts of the VII All-Union Symposium on Mechano-Emission and Mechanochemistry of Solids], t. 1. October 24–26, 1979. Tashkent: TashPI, 1981, pp. 8–12.
- [16] Kendal K. Thin – film peeling – the elastic term. *J. Phys. D* 8, 1975, pp. 1449–1453.
- [17] Andreykin A.E., Lysak N.V. *Metod akusticheskoy emissii v issledovanii protsessov razrusheniya* [Acoustic emission method in the study of fracture processes]. Kyiv: Naukova Dumka, 1989, 137 p.
- [18] Evdokimov Yu.M., Figovskiy O.L., Kestel'man V.N. *Elektroadgezija — itog (otkrytie, razvitie, perspektivy)* [Electro-adhesion — the result (discovery, development, prospects)]. Sb. tezisev Kh Ezhegodnoy Yubileynoy konferentsii Nanotekhnologicheskogo obshchestva Rossii [Sat. Abstracts of the 10th Annual Anniversary Conference of the Nanotechnological Society of Russia], March 26–28, 2019. Moscow: Russian Corporation of Nanotechnologies State Corporation, 2019, pp. 34–36.
- [19] Chernova V.V. *Razrabotka metodiki akustiko-emissionnogo kontrolya defektov na ranney stadii razvitiya v izdeliyakh iz kompozitnykh materialov* [Development of a technique for acoustic emission control of defects at an early stage of development in products made of composite materials]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Novosibirsk, Siberian State University of Communications, 2016, 144 p.
- [20] Evdokimov Yu.M. *Rentgenovskoe izluchenie s ruchnym privodom* [X-ray radiation with a manual drive]. Nezavisimaya gazeta. Prilozhenie: NG-NAUKA [Nezavisimaya gazeta. Appendix: NG-NAUKA], 11. 03. 2009, p. 13.
- [21] Mambetov D.M. *Elektricheskie yavleniya pri adgezionnom i kogezionnom razrushenii tverdykh tel* [Electrical Phenomena in Adhesive and Cohesive Fracture of Solids]. Ed. N.A. Krotova. Frunze: Mektep, 1973, 135 p.
- [22] Gubaydullin Z.Kh. *Issledovanie sveceniya i elektricheskikh protsessov, soprovozhdayushchikh razrushenie kristallogidratov i strukturnye preobrazovaniya produktov degidratatsii* [Study of luminescence and electrical processes accompanying the destruction of crystalline hydrates and structural transformations of dehydration products]. Dis. Cand. Sci. (Phys.-Math.). Moscow, Institute of Physical Chemistry, Academy of Sciences of the USSR, 1975, 21 p.
- [23] Panin S.V., Burkov M.V., Byakov A.V., Lyubutin P.S. *Kombinirovannyi metod issledovaniya deformatsii i razrusheniya obraztsov iz uglevodnogo kompozitsionnogo materiala po dannym akusticheskoy emissii, korrelyatsii tsifrovyykh izobrazheniy i tenzometrii* [Combined method for studying the deformation and destruction of samples from a carbon-carbon composite material according to acoustic emission data, correlation of digital images and strain gauge]. *Vestnik nauki Sibiri* [Bulletin of Science of Siberia], 2012, no. 4 (5), pp. 120–138.
- [24] Musuraliev T.M. *Issledovanie vliyaniya razlichnykh faktorov na gazorazryadnye yavleniya pri otryve plenok polimerov ot tverdykh podlozhek* [Investigation of the influence of various factors on gas-discharge phenomena during the detachment of polymer films from solid substrates]. Dis. Cand. Sci. (Phys.-Math.). Bishkek, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 1996, 21 p.
- [25] Tyurikova L.A., Averbukh B.G., Moskvitin N.I., Krotova N.A. *Issledovanie parametrov radioizlucheniya pri narushenii adgezii polimer — tverdoe telo* [Tech. Investigation of the parameters of radio emission in the event of violation of adhesion polymer — solid]. *DAN SSSR*, 1971, v. 201, no. 4, pp. 833–835.
- [26] Drobot Yu.B., Lazarev A.M. *Nerazrushayushchiy kontrol' ustalostnykh treshchin akustiko-emissionnym metodom* [Non-destructive testing of fatigue cracks by acoustic emission method]. Moscow: Standards, 1987, 218 p.
- [27] Wei Y., Hutchinson J.W. Interface strength, work of adhesion and plasticity in peel test. *Intern. J. of Fracture*, 1998, v. 93, pp. 315–333.
- [28] Bull S.J. Failure modes in scratch adhesion testing. *Surfaces and Coat. Technol.*, 1991, v. 50, no. 1, pp. 25–32.
- [29] Kluev V.A., Toporov Yu.P., Aliev A.D., Chalykh A.D., Lipson A.G. The effect of air pressure on the parameters of X-ray emission accompanying adhesive and cohesive breaking of solids. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1989, v. 34, pp. 361–364.
- [30] Khaynik G. *Tribokhimiya* [Tribochemistry]. Moscow: Mir, 1987, 584 p.
- [31] Sodomka L. *Mechanoluminescence*. Praha: Vydala Academia, 1985, 225 p.
- [32] Kestelman V., Pinchuk L., Goldade V. *Electrets in Engineering. Fundamentals and applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London: Springer Science+Business Media New York, 2000, 281 p.
- [33] Vorob'ev A.A., Zavodovskaya E.K., Sal'nikov V.N. *Izmenenie elektroprovodnosti i radioizluchenie gornyykh porod i mineralov pri fiziko-khimicheskikh protsessakh v nikh* [Changes in electrical conductivity and radio emission of rocks and minerals during physical and chemical processes in them]. *DAN SSSR*, 1975, v. 220, no. 1, pp. 82–83.
- [34] Korovkin M.V. *Elektromagnitnye efekty v radiodapazone, svyazannye s dinamikoy radiatsionnykh defektov v dielektrikakh* [Electromagnetic effects in the radio range associated with the dynamics of radiation defects in dielectrics]. Dis. Dr. Sci. (Phys.-Math.). Tomsk, TPI, 1998, 308 p.
- [35] Thiessen P.A., Meyer K., Heinicke G. *Grundlagen der Tribochemie*. Berlin: Akad. Verlag, 1967, 194 p.
- [36] Lunegova E.M. *Analiz zakonov nakopleniya povrezhdeniy pri deformirovani uglevodnykh kompozitov i keramicheskikh pokrytiy na osnove registratsii signalov akusticheskoy emissii* [Analysis of the patterns of damage accumulation during the deformation of carbon composites and ceramic coatings based on the registration of acoustic emission signals]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2021, 200 p.
- [37] Evdokimov Yu.M. *Issledovanie elektroadgezionnykh yavleniy i vozmozhnosti sozdaniya i narusheniya adgezionnogo kontakta pri nalozhenii vneshnego elektricheskogo polya* [Investigation of electroadhesive phenomena and the possibility of creating and breaking adhesive contact when an external electric field is applied]. Dis. Cand. Sci. (Chem.). Moscow, MTILP, 1968, 137 p.
- [38] Evdokimov J.M., Kestelman V.N., Schindel-Bidinelli E. *Electro-adhesive Joints*. Abstract book Jnt. Adhesion Symposium JAS 94, The adhesion society of Japan, Tokyo, November 06–10, 1994, pp. 261–262.
- [39] Yamagishi T., Node S., Chishima Y., Fukuzawa V. Basic research on the mechanism of pressure sensitive Adhesive tape, no. 1–2, 1994, pp. 177–180.

- [40] Almataev T.O., Almataev N.T. Studies of tribotechnical properties of composite polymeric materials of machine designation. Scientific Bulletin. Physical and mathematical Research, 2019, iss. 2, v. 1, Article 6, pp. 53–57.
- [41] Jewdokimov Ju.M. Der Einflub auBerer elektrischer und magnetischer Felder auf die Adhasion. Kurzfassungen 3 / Symposium fur Triboemission und Tribochemie, Kammer der Technik, Berlin, DDR, pp. 26–27.
- [42] De R., Ananthakrishna G. Dynamics of the peel front and the nature of acoustic emission during peeling of an adhesive tape. Phys. Rev. Lett., 2006, v. 97 (16), pp. 165503–165506.
- [43] Chalykh A.A., Gerasimov V.K. *Vliyaniye deformatsionnykh kharakteristik polimerov na ikh adgezionnuyu sposobnost'* [Influence of deformation characteristics of polymers on their adhesion ability]. Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya [Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical Technology], 2003, v. 46, no. 1, pp. 43–46.
- [44] Napolitano M.J., Chudnovsky A., Moet A. The constrained blister test for the energy of interfacial adhesion. J. Adh. Sci Technol., 1988, t. 2, no 4, pp. 311–323.
- [45] Moskvitin N.I. *Skleivaniye polimerov* [Bonding of polymers]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1968, 304 p.
- [46] Evdokimov Yu.M., Grusheva T.G. *Lipkie lenty v nauchnykh issledovaniyakh* [Adhesive tapes in scientific research]. NBICS-NT, 2020, no. 10 (4), pp. 42–50.
- [47] Keim N.C., Medina D. Mechanical annealing and memories in a disordered solid. Science advanced, 2022, v. 8, iss. 40. DOI:10.1126/sciadv.abo1614
- [48] Evdokimov Yu.M., Sulimenko V.A., Meshcheryakov A.V., Russkikh D.V. *Istoriya sozdaniya elektroadgezionnykh soedineniy* [The history of the creation of electroadhesive joints]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 107–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-107-113 3

## Authors' information

**Evdokimov Yuriy Mikhaylovich**  — Cand. Sci. (Chem.), Professor of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, evdokur@mail.ru

**Figovskiy Oleg L'vovich** — Dr. Sci. (Tech.), Israel Association of Inventor, Haifa, figovsky@gmail.com

Received 19.12.2022.

Approved after review 26.12.2022.

Accepted for publication 14.06.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest