

В.П. Ромбах  
 КАТАСТРОФИЧЕСКАЯ УСТАЛОСТЬ: ПРИЗНАКИ И ДИАГНОСТИКА  
[vrombakh@hotmail.com](mailto:vrombakh@hotmail.com)

Edmonds, WA USA

*Всякой истине суждено одно мгновение торжества  
 между бесконечностью, когда ее считают неверной, и  
 бесконечностью, когда ее считают тривиальной.*

А. Пуанкаре

**Abstract**

**Catastrophic fatigue: signs and diagnostic<sup>1</sup>.**

The problem of engineering constructions collapse prevention has been considered. It was shown that the metal fatigue visible signs (cracks, corrosion, and one to another element bonding weakening) are the consequence of latent metastable areas of maximum defect concentration (MAMDC) and metastable areas of maximum energy density (MAMED) formation. The formation of these areas is caused by deformation waves interference. The atom bond oscillations have been considered. The cracking mechanism formation has been discovered. The coherent metalphysics conception was suggested. MAMDC and MAMED nondestructive testing methods have been offered.

Key words: metal fatigue diagnostics, corrosion, cracking, engineering constructions collapse.

**Аннотация**

Рассмотрены проблемы предотвращения катастрофического разрушения технических сооружений. Показано, что видимые признаки усталости металла (трещины, коррозия и ослабление крепления одного элемента к другому) являются следствием развития невидимых метастабильных областей максимальной плотности дефектов (МОМПД) и максимальной концентрации энергии (МОМПЭ). Образование таких областей обусловлено интерференцией волн деформации. Рассмотрены осцилляции межатомной связи. Введено понятие когерентная металлофизика. Дано определение катастрофической усталости. Раскрыт механизм трещинообразования. Предложены методы неразрушающего мониторинга.

Ключевые слова: усталость металла, питинговая коррозия, трещины, диагностика, катастрофы технических сооружений.

**Введение.**

Проблема надежности и долговечности является ключевой для материаловедения. По определению *надежность есть* свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Долговечность, как и надежность, определяются числом циклов надежной работы технического устройства. Оба параметра теснейшим образом связаны с прочностью и усталостью металла. Статистический характер этих параметров, не исключает того, что неблагоприятная ситуация может сложиться не через миллиард или миллион циклов, а

<sup>1</sup> Написана в 2008. Публикуется впервые.

значительно раньше. В таком случае повреждение технического сооружения происходит неожиданно и нередко приводит к катастрофе. Это означает, что усталость достигла предела и каждое, ранее допустимое, воздействие может оказаться последним. Особенно опасными оказываются катастрофы, которые происходят при соблюдении всех технических условий. Такие катастрофы считаются загадочными. Попытки объяснить их, пользуясь лишь механическими моделями, бесперспективны. В подавляющем большинстве публикаций, посвященных проблемам упрочнения и разрушения металла, в том числе, выполненных на наноуровне, взаимодействие атомов и его изменение при внешнем воздействии, не рассматривается.

Однако именно в наноразмерной области начинается формирование как кристалла, так и дефектов в нем, как это показано автором в работах [1-4]. Опираясь, главным образом, на работу [4], приведем анализ причин техногенных катастроф и путей их предотвращения.

### **Анализ некоторых катастроф.**

1. 11 ноября 2007 во время шторма в Керченском проливе раскололся пополам и затонул танкер «Волгонефть-139». Ведущий конструктор создания кораблей такого типа Ю. Руденко [5] прокомментировал это кораблекрушение следующим образом: «Когда вершины двух соседних волн располагаются в районе носа и кормы, проседает мидель (середина) судна. И наоборот, если вершина волны находится в середине судна, то свисают книзу его носовая и кормовая части. Понятно, что наихудший вариант, когда расстояние между вершинами двух соседних волн совпадает с длиной судна. Повидимому, это и произошло с танкером «Волгонефть-139». При очередной высокой волне напряжение на разрыв не выдержала сначала или верхняя палуба – что наиболее вероятно, или днище. А затем разрыв очень быстро распространился на все поперечное сечение корпуса танкера.

Такие случаи в мире хотя и редко, но бывают». При этом он уточнил: «Однако считать, что главным виновником разлома корабля является шторм и, соответственно, высокие волны – неправильно.... *Это связано и с коррозией металла, и с так называемой «усталостью» металла».* (Курсив мой).

В работе [4] приводился пример раскола корабля в спокойной гавани. На Рис. 1 [6] приведено еще одно кораблекрушение, из которых можно сделать вывод о том, что усталость накапливается, ее результат может проявиться подобно взрыву мины замедленного действия. Это означает, что катастрофическое разрушение носит стимулированный характер. Такую роль мог сыграть и шторм. Руденко сравнил эту катастрофу с разрушением моста (I 35 Bridge #9340) через Миссисипи (США), которое произошло 1 августа 2007 г. Как было зафиксировано видеокамерой, разрушению моста (Рис. 2 [7]) предшествовали интенсивные колебания, продолжавшиеся 10 секунд. Обратим внимание на то, что по мнению очевидцев, мост вначале стал подниматься, а затем опускаться. Это означает, что происходило расширение металла и лишь затем разрыв и обрушение. Подобная ситуация имеет место и при изгибе рельса под вагонами движущегося поезда.

2. На основе протоколов [8-20] инспекций моста, проведенных в течение 13 лет (1994-2006 гг), рассмотрим процесс развития дефектов, приведших к катастрофе<sup>2</sup>. Детальный анализ, представляющий интерес для узких специалистов, выходит за рамки данной статьи. Мы рассмотрим данную катастрофу в качестве одного из примеров развития усталости металла на основе модели металла, предложенной автором. Показано, что в металле при циклической деформации образуются две метастабильные области: область максимальной концентрации

<sup>2</sup> Протоколы инспекций, выполненных в одной из наиболее индустриально развитой стран, свидетельствуют о том, что состояния моста оценивалось лишь визуально. Однако, как было установлено при исследовании фюзеляжа самолета [21], невидимые (спящие трещины), образуемые вблизи заклепочных отверстий, составляют до 98 %. Из-за дифракции волн деформации длина некоторых видимых трещин может в тысячи раз превышать длину остальных [22].

дефектов (МОМКД) и максимальной плотности энергии (МОМПЭ). Для анализа ограничимся демонстрацией развития дефектов лишь в некоторых элементах моста.

Мост имел 14 стрингеров. В исходном для анализа протоколе [8] отмечено выпадание болтов. В 1996 было повреждено или отсутствовало 11 болтов, соединяющих стрингер с поперечной балкой, причем одно из креплений лишилось трех болтов [10]. В 1997 требовалась замена уже 20 болтов. Ежегодно их число возрастало. Интенсивной коррозии подверглись соединения важнейших узлов, как это показано на Рис. 3 [15]. Узкая область, подверженная интенсивной коррозии, и есть МОМКД. Вблизи нее располагается область МОМПЭ, которая выявляется лишь в специализированных современных лабораториях. МОМПЭ представляют серьезную опасность тем, что в них накапливается энергия, мощность выделения которой при стимулированном кратковременном ( $10^{-6}$ - $10^{-8}$  с) излучении может оказаться достаточной для катастрофического разрушения. Еще более узкая область МОМКД образовалась вблизи болтов и их креплений, как это показано на Рис. 4 [19]. Следовательно, самые важные элементы сооружения оказались более всего ослабленными.

Три фактора: интенсивная коррозия, самоотвинчивание гаек и болтов и трещинообразование выявляются визуально. Эти признаки свидетельствуют о развивающейся усталости металла, подобно тому, как повышение температуры или боль сигнализирует о ней человеку. Выпавшие болты заменялись новыми, трещины высверливались, элементы конструкции перекрашивались. Казалось бы, что этим можно избежать катастрофы, но она произошла. Сами эти факторы есть следствие процессов развития МОМКД и МОМПЭ. Образно говоря, они лишь верхушка того айсберга, который накапливался в сооружении. Необходимо отметить, что определенную роль в катастрофе сыграл и человеческий фактор. Протоколы инспекций [19, 20] свидетельствуют о том, что проверка состояния моста в течение двух лет, предшествующих катастрофе, выполнялась недопустимо небрежно<sup>3</sup>.

3. При взлете самолета Геркулес С-130А 17 июня 2002 г отвалились оба крыла (Рис. 5) [23]. На видеореокадрах видно, как они одно за другим отделились от фюзеляжа. Весь этот процесс длился 7 секунд. Обратим внимание на этот факт, свидетельствующий о стимулированном характере, не анализируя другие причины.

4. За короткий период в Москве произошли три трагических события: обрушение кровли Трансвааль аквапарка, Басманного рынка и потеря элемента конструкции в Ледовом дворце Крылатское. К сожалению, мы не располагаем протоколами специальных исследований и ограничены лишь обрывочными сведениями. Протицируем фрагмент из статьи [24]: «Температура наружного воздуха в этот момент равнялась  $-20^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура внутри аквапарка составляла  $+29^{\circ}\text{C}$ , а непосредственно под кровлей она была существенно выше. В результате температурный контраст составлял порядка  $50^{\circ}\text{C}$  и более. Тем не менее, претензии в первую очередь следует отнести *не к конструкции кровли*, а к недостаткам системы поддержания микроклимата, которая в силу своего основного назначения была обязана предотвратить *конденсацию влаги с растворенной в ней соляной кислотой на внутренней поверхности кровли.*» (Курсив мой).

Судя по описанию, выделенное курсивом представляется одной из наиболее важных причин процесса ослабления металла, завершившегося разрушением. Обоснуем такой вывод. Срок эксплуатации Трансвааль парка оказался в 25 раз короче, чем у моста № 9340. Разумеется, условия эксплуатации моста и Трансвааль парка различны. По мнению экспертов запас прочности парка был достаточным. Следовательно, ослабление прочности крепления кровли обусловлено теми процессами, которые активизировались внутри металла. Влияние хлора, влаги, водорода и кислорода на ускорение коррозии доказано многочисленными экспериментами. Но внешняя коррозия, подобная той, которая имела место у моста, в

<sup>3</sup> Именно для специалистов сделана ссылка на протоколы инспекций за 13 лет.

элементах конструкции парка не наблюдалась. Это, однако, не означает, что она отсутствовала. При тех внешних условиях, в которых находились крепления, они подвергались интенсивному воздействию хлора, водорода и кислорода, которые проникали в стыки креплений. Как известно, в таком случае ускоряется фреттинговая коррозия. По мнению автора именно она сыграла основную роль в разрушении моста № 9340 после сорокалетней его эксплуатации.

Огромную опасность в ряде случаев представляет собой локализованная питтинговая коррозия. Так в апреле 1992 в Гвадалахаре (Мексика) в результате питтинговой коррозии коллектора канализационных газов погибло 215 и ранено 1500 человек, повреждено 1600 зданий. В сентябре 2006 г. в г. Красногорске (Подмосковье) на насосной станции произошел взрыв канализационных газов, при котором погибли люди, город остался без воды, едва не произошло загрязнение Москва-реки. Сведениями об исследованиях металла до и после взрыва автор не располагает, точно так же как и в случае Трансвааль парка.

Чтобы понять, как началось разрушение Трансвааль парка, процитируем еще раз работу [24]. «Проблемы начались с одной из колонн (8Г), на которые опирается наружная часть купола, — возле опоры, *примерно в метре от поверхности земли, появилось темное облако*. Следующий кадр — колонна надламывается в этом месте и валится наружу. Не выдержав нагрузки, валятся наружу соседние колонны. Наблюдавшееся облако объяснено механическим разрушением штукатурки, которой была снаружи облицована каждая из колонн в целях обеспечения пожарной безопасности. Кроме того, внешний вид облака и характер его распространения свидетельствует о наличии объемной конденсации за счет прорвавшегося наружу холодного воздуха, который интенсивно смешивался с теплым и влажным воздухом внутри помещения. *В таком случае зафиксированное поведение колонны являлось не причиной, а следствием разрушения кровли.*» (Курсив мой). Сделаем несколько замечаний.

- Последовательность разрушения элементов сооружения имеет чрезвычайно важное значение для выяснения **основной причины** катастрофы. Будем исходить из того, что разрушение не связано со взрывом взрывчатых веществ. В таком случае ключом к решению проблемы может послужить последовательность облако→разлом колонны→обрушение. Версия о том, что причиной локализованного разлома колонны является встреча холодного и теплого воздуха несостоятельна. Для этого необходима мощность, подобная торнадо, которое было бы зафиксировано как видеокамерой, так и очевидцами по характерным для вихрей признакам.

- Выброс облака ассоциировался со взрывом. Это значит, что существовали силы, направленные от центра колонны. Если принять, что облако состояло из штукатурки, то она должна была быть предварительно измельчена. Все это начиналось примерно в одном метре от поверхности земли и произошло в течение двух кадров. Разрушение, подобное взрыву, наблюдалось неоднократно. Так в октябре 2000 г. вблизи Хатфилд (Hatfield UK) под вагонами поезда, движущегося со скоростью 185 км/ч на 35 метровом участке упрочненный рельс разорвало на 300 кусков. На 50-метровом участке образовались трещины [25]<sup>4</sup>. При ультразвуковом контроле, проведенном накануне, никаких дефектов не было обнаружено. Нельзя считать высокую скорость поезда основной причиной катастрофы, ибо в 1912 г. при значительно меньшей скорости рельс разорвало на 17 кусков [26].

- Существенное влияние на усталостное ослабление всего металла сыграл водород. Интенсивному проникновению водорода в металл способствовали: 1) ослабление связи атомов, расположенных на поверхности, под влиянием влаги и хлора, 2) температурный градиент, 3) деформации, вызванные разностью температур и ее изменением.

- Особенно опасными были сдвиговые деформации, резко ослабляющие прочность металла. Экспериментально установлено как на макро- [27], так и на микроуровне [28, 29], что

<sup>4</sup> На этой веб-странице читатель найдет все отчеты инспекций моста.

под влиянием деформации на границах зерен образуется аморфный слой, модуль сдвига которого близок или равен нулю. Процесс образования такого слоя ускоряется присутствием водорода [29].

- Образование МОМКД и МОМПЭ обусловлено стрячими волнами деформации в колонне, представляющей собой резонатор. Близко расположенные МОМКД и МОМПЭ образуют домен усталости. Выделение энергии носило стимулированный характер, как и во всех подобных катастрофах.

- **Итак, основной объективной причиной разрушения Трансвааль парка являются изменения межатомного взаимодействия в металлах и сплавах, которым пренебрегли.**

К счастью, в Ледовом дворце Крылатское поврежденная деталь лишь послужила сигналом о возможной катастрофе и все обошлось без человеческих жертв. Будем исходить из того, что любая возможность предотвратить катастрофу должна быть использована и важен каждый факт, даже если он кажется второстепенным.

Рассмотрим два других примера.

1. При первичном визуальном исследовании фрагментов разрушенного рельса [25] было установлено, что поверхности разрыва были *блестящими* (bright) или *черными* (black). Была намечена широкая программа научных, в том числе структурных, исследований. Однако результаты структурных исследований до 2004 г. нигде не публиковались. На запрос автора, где можно ознакомиться с результатами исследований, руководитель лаборатории Здоровья и Безопасности Великобритании (Health & Safety Laboratory, HSL) ответил, что в интересах следствия материалы не разглашаются. Такое решение противоречит логике: во-первых, результаты исследований могут быть опубликованы таким образом, что при этом не разглашается коммерческая тайна, во-вторых, результаты объективной экспертизы не должны зависеть от решения суда, во-третьих, *блестящие* и *черные* фазы были выявлены и исследованы в рельсах после их эксплуатации в 1971 г. [31] и при испытаниях в 1985 г. [32]. Суд состоялся в 2005 г. Заключительный отчет опубликован в 2006 г. Ему предшествовали десятки публикаций, посвященных анализу причин катастрофы, в том числе и специальных исследований проблемы контактной усталости при качении (R31.086, Post Hatfield investigation о Rolling Contact Fatigue [33]). Но в них нет ни слова о результатах структурных исследований.

Особый интерес представляют *блестящие* и *черные области*. Показано [4], что они формируются из катионных и анионных кластеров и имеют различную структуру и прочность. Как правило, они располагаются под поверхностью металла и выявляются лишь при шлифовке или разломе металла. После разлома процессы взаимодействия этих областей с внешней средой продолжаются. На Рис. 6 показаны фотографии двух поверхностей раскола рельса, взятые из заключительного отчета [25]. Поверхность, бывшая ранее черной, подверглась интенсивной коррозии, тогда как другая не претерпела изменений. Невозможно понять, как столь очевидный факт остался незамеченным. Необходимость исследования двух этих поверхностей на ранней стадии после разрушения, не вызывает сомнения. Однако информация о структурных изменениях в металле не опубликована.

2. 1 мая 2002 г. на стрелке № 2184 вблизи станции Поттерс Бар (Potters Bar, UK) [34] были обнаружены две отвинченные гайки. Их установили на место. 10 мая эти же гайки оказались вновь отвинченными, но уже под вагоном поезда, потерпевшего катастрофу. В письме, направленном в HSL, автор предупредил о том, что возвращение отвинченных гаек было роковой ошибкой, повторение которой недопустимо. Однако предупреждение не было учтено.

20 ноября 2002 г. восточней станции Саутхолл (Southall, UK) на стрелке 8175А при аналогичных обстоятельствах (самоотвинченные гайки, болты) сошел с рельсов экспресс [35].

К счастью, обошлось без жертв, но катастрофа не послужила уроком, так как 23.02.07 (Grayrigg, UK) произошла третья идентичная катастрофа, но снова с жертвами [36]. Лишь после этого случая начали разрабатываться рекомендации относительно замены болтов.

3. Нет информации и о структурных изменениях, которые произошли с поврежденной деталью в Крылатском. Располагая лишь скудными сведениями о характере повреждения, попытаемся все же ответить на вопросы: Что и Почему произошло?

Из 19 однотипных элементов через короткий промежуток времени один из них оказался поврежденным: раскололся и частично выпал, *но кровля не рухнула*.

Кратко прокомментируем мнение специалиста, поставившего значительную часть металлических элементов –директора Электростального завода В. Зарудного [37].

А) «... созданная комиссия не учитывала динамические нагрузки на здание и его осадку».

Если такое обвинение обосновано, то выводы комиссии нельзя признать объективными. Более того, предполагать, что низкое качество детали является единственной причиной ее разрушения. Показано [4], что любое внешнее воздействие распространяется в металле в виде волн деформации. Вследствие интерференции энергия внешнего воздействия распределяется в металле неравномерно. Доказательством этого служит четко выраженная локализация мест повреждения, в том числе и в данном случае.

Б) «Проектировщиками был заложен неправильный материал, применяемая марка стали отсутствует в строительных СНИПах, а в западных странах вообще запрещена, поскольку является очень хрупкой».

В этой фразе можно выделить два фактора. Во-первых, специалист обязан был отстоять такое мнение до разрушения, а не сообщать о нем после катастрофы. Во-вторых, оценка «очень хрупкая» является субъективной, в то время как существуют объективные параметры металла (количественный состав, технология, результаты испытаний), но они нигде не фигурируют.

Нет сомнения в том, что в процессе эксплуатации произошли серьезные изменения структуры поврежденного элемента. Под ними следует понимать не только изменение местоположения атомов, но и конфигурации электронной оболочки самих атомов. **Экспериментально установлено, что при циклическом воздействии в металле происходят такие изменения, как декарбонизация, переходы феррит↔мартенсит, сегрегация и т.п. В связи с этим обратим внимание на то, что оставшаяся часть поврежденного стержня оказалась такой, что заменила собой целый стержень.**

Как можно объяснить этот феномен?

Однозначный ответ можно дать лишь в том случае, когда известны параметры стержня в исходном состоянии и его составных частей после раскола. Не имея их, можно строить предположения, основываясь на других экспериментальных фактах. Так, например, в стальном образце, имеющем твердость 1,47-1,67 ГПа, после удара образовалось несколько областей, имеющих различную твердость, одна из которых-5,67-9,16 ГПа [38]. В работах [31, 32] было показано, что металл не только ослабляется, но и локально упрочняется. В поврежденном рельсе блестящие фрагменты имели твердость в 2,5-4 раза выше исходного сплава. Было замечено [39], что на каждые 1600 км в рельсе образуется особо опасная область, прочность материала в которой в четыре раза ниже первоначальной. Таким образом, можно лишь гадать о свойствах металла трех фрагментов.

**Но, чтобы сказать в каком состоянии находятся оставшиеся 18 стержней и как с ними поступить, необходимо знать о тех изменениях, которые произошли!**

В связи с этим следует согласиться с выводом В) о том, что «... качество металла не может рассматриваться как основная версия причины разрушения стержня». *Ибо один из стержней может оказаться в максимуме волн интерференции, тогда как другой в минимуме и воздействие на них будет различным, а отсюда и срок службы.*

Поражает то, что устройство автоматического контроля смещения стержней может быть достаточно простым и надежным, но его не было.

Отметим, что публикация результатов исследования позволила бы организовать мозговую атаку для выявления **природы и процессов развития усталости, и способов ее диагностики.**

В этом плане и следует рассматривать данную работу, в которой основное внимание уделено механизму развития усталости, без учета человеческого фактора.

### **Колебательные химические реакции и фемтохимия**

Белоусовым в 1951 г. была открыта реакция, которая казалась бы противоречила второму началу термодинамики, и его статьи отвергали редакции ведущих журналов. Первая публикация появилась лишь 8 лет спустя [40]. Первое теоретическое обоснование реакции было дано Жаботинским [41].

Отметим, что колебательные реакции сопровождаются особыми волнами, более того, стоячими волнами, а следовательно интерференцией волн. Интерферировать могут только когерентные волны. Напомним, что когерентными называются волны, сохраняющие разность фаз.

После того как Пригожиным [42] было показано, что колебательные реакции не нарушают второе начало термодинамики и не только возможны, но и вполне вероятны, интерес к ним сильно возрос. Создание лазеров, генерирующих световые импульсы длительностью несколько фемтосекунд ( $\sim 10^{-15}$  с), послужило фундаментом, на котором возникла новая отрасль химии-фемтохимия [43, 44]. Ее еще называют когерентной химией. Успех этой отрасли и дальнейшее ее интенсивное развитие предопределяет то, что длительность электромагнитного импульса в 10-100 раз меньше периода колебания атомов в молекуле и за время съемки атомы как бы замирают. Это позволяет поэтапно проследить за протекающей между атомами реакцией. Установлено, что химическая когерентность проявляется на макроуровне осциллирующей реакционной способности *импульсно приготовленного ансамбля* реагирующих частиц. Эти осцилляции модулируют выход продуктов реакции. В связи с этим исследование химической реакции осуществляется методом накачки-зондирования (pump-probe). Экспериментальная установка содержит два фемтосекундных лазера, первый из которых «готовит» частицы (накачка), второй, через определенный временной интервал исследует (зондирование).

Реакция Белоусова-Жаботинского-один из примеров макроскопической когерентности. Однако для ее осуществления и наблюдения не требуется фемтосекундные лазеры.

Как установлено [45-46], питтинговая коррозия тоже носит колебательный характер и сопровождается осцилляциями тока, свидетельствующими об изменении областей МОМКД и МОМПЭ. На Рис. 7, взятом из работ [45, 46], это области, обозначены а и в.

Не вдаваясь в детальное рассмотрение результатов этих исследований, относящихся к природе коррозии, отметим лишь те особенности образования питтинговых дефектов (ПД), которые помогут понять механизм формирования усталости, приводящей к катастрофическому разрушению.

Авторы обратили внимание на следующее:

- существуют два вида ПД: активные и пассивные, которые могут переходить из одного состояния в другое, в результате этого коррозия носит характер атаки;
- часть ПД окружена гало;
- взаимопревращение активных и пассивных ПД сопровождается осцилляциями тока.

Прокомментируем эти наблюдения.

ПД размером  $\sim 10$  мкм (В и С) состоят из центральной (темной) части, окруженной светлым (С), темным (В) облаком или лишены облака. Изменение размеров темного облака сопровождается изменением тока на  $8 \cdot 10^{-8}$  А, тогда как исчезновение светлого-на  $2 \cdot 10^{-3}$  А. Скачки тока при коррозии на 4-5 порядков наблюдались и ранее [47] на макроскопических образцах. Они обусловлены образованием анодной и катодной зон, как это показано на Рис. 8 [48]. Изменение цвета облака связано с изменением границы фундаментального поглощения света, обусловленного изменением структуры [49].

Постараемся раскрыть электронный механизм образования ПД, так как в цитируемых работах он не рассматривался.

Обратим внимание на характер изменения тока. Относительно медленное его нарастание сменяется резким спадом. Возрастание тока связано с одним из факторов: увеличением числа носителей, снижением рассеяния или этими двумя факторами одновременно. Увеличение числа носителей обусловлено дополнительной ионизацией атомов, аналогично тому как это происходит при окислительных реакциях, например железа:  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$ .

При наличии кислорода электроны могут быть захвачены атомами кислорода и образуется окись. Возрастание тока свидетельствует о том, что между образованием  $\text{Fe}^{3+}$  и окиси имеет место очень большой, для атомных процессов, промежуток времени. Следовательно, электроны каким-то образом накапливаются. Вероятность того, что при этом образовалось устойчивое облако повышенной плотности свободных электронов крайне мала. Более вероятным представляется, что часть электронов рекомбинирует с ионами  $\text{Fe}^{2+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{1+}$ . В этом случае образуются катионный и анионный кластеры, в одном из которых накапливается энергия, в другом-электроны. О том, что обмен энергией и электронами двух кластеров может носить стимулированный характер, свидетельствует резкое падение тока. Оно тем круче, чем меньше ПД. Часть электронов захватывается кислородом и образуется окись. Кислород и  $\text{Fe}^{2+}$  выступают как конкурирующие акцепторы. При наличии катализаторов (галогены, водород) и свободном доступе кислорода коррозия протекает особенно интенсивно. В максимумах интерференции волн деформации образуются ионы  $\text{Fe}^{3+}$ . Дефицит кислорода (или полное его отсутствие) приводит к тому, что свободные электроны могут рекомбинировать уже с ионами  $\text{Fe}^{1+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^0$  и даже с  $\text{Fe}^0 + e^- \rightarrow \text{Fe}^{1-}$ .

Образование ноль-валентного железа не только экспериментально доказано, но и нашло техническое применение. Наличие ионов  $\text{Fe}^{1-}$  в деформированной стали тоже не гипотеза, а экспериментально подтвержденный факт, как это показано на Рис. 9 [50].

Таким образом, в металле образуются две области. В одной из них накапливаются высокоионизованные атомы металла, в другой-слабоионизованны. Особая опасность коррозии под нагрузкой обусловлена тем, что, во-первых, при циклическом воздействии происходит отделение окисла (шелушение) и облегчается доступ кислорода к металлу, во вторых, образуются новые низкоионизованные и высокоионизованные области. При определенных условиях, даже под нагрузкой, коррозия может происходить столь интенсивно, что трещины не образуются, как это произошло с лопатками паровой турбины, Рис. 10 [51].

В связи с вышеизложенным становится ясным механизм катастрофического разрушения креплений<sup>5</sup>. Области, в которых атомы металла имеют пониженную валентность (МОМКД) максимально ослаблены. Когда такая область возникает вокруг болта или заклепки, то крепление ослабляется. Амплитуда смещений возрастает. Между трущимися деталями образуются наночастицы металла. Экспериментально доказано, что температура плавления таких частиц сильно понижена, а реакционная способность, тем более в присутствии

<sup>5</sup> Сварное крепление не рассматривается, так как механизм образования трещин в нем иной.



катализаторов, возрастает. Твердость окисла значительно превышает твердость сплава. В этих условиях окись выступает в роли абразива<sup>6</sup>. Это хорошо прослеживается на рисунке 4.

В то же время, появление ионов  $Fe^0$  приводит к ослаблению связи между атомами как металл-металл, так и металл-неметалл. Это способствует декарбонизации, сегрегации, изменению размеров зерен, образованию аморфного слоя между зернами и межкристаллитной коррозии. Таким образом, в МОМКД возрастает не только концентрация дефектов, но происходит изменение структуры.

Образование МОМКД и МОМПЭ подобно образованию отрицательно и положительно заряженных облаков. Как известно, возникновению молнии предшествует образование лидера-канала, в котором воздух оказывается высокоионизованным.

### Осцилляции силы связи между атомами.

Еще в первом издании книги «Природа химической связи», вышедшей в 1938 г, Полинг отмечал: «Непрерывный переход от максимального значения одного вида связи к максимальному значению другого (*ковалентной к металлической, ковалентной к ион-дипольной* и т.п) может иметь место и связь в промежуточном состоянии может рассматриваться в терминах *резонанса* подобно ковалентно-ионной связи». (Курсив мой). Не имея такого экспериментального обоснования, которым располагает современная химия, Полинг, однако, не отказался от этой идеи. В предисловии к третьему изданию записано: «*Я согласен с Пуанкаре, что значительно лучше предсказать, не имея достаточных оснований, чем не предсказывать вообще*». Предсказания Полинга оказались верными.

На Рис. 11, взятом из работы [43], показаны осцилляции ковалентной и ионной связи NaI. Так как этот рисунок стал обязательным элементом практически всех учебных пособий по фемтохимии, то мы ограничимся лишь комментариями Зевейла [44], получившего Нобелевскую премию за разработку основ фемтохимии: «Резонансные переходы между ковалентной и ионной связью есть ключ к динамике разрыва связи. ...Эксперименты с NaI явились поворотным моментом, ведущим к совершенно новой *парадигме* в области фемтохимии и породили новую концепцию динамики химической связи». (Курсив Зевейла, подчеркнуто мной).

Известно, что в галогенах при определенном внешнем давлении происходит металлизация (Cl-130, Br-56,4, I-27,9 ГПа) т.е. металлическая связь сменяет ковалентную. Бацановым [52] было установлено, что в соединении  $Rb^+I^-$  при изменении давления происходит изменение ионной связи на ковалентную, а при 275 ГПа связь вновь становится ионной, но у компонентов происходит инверсия знака, т.е. образуется соединение  $RbI^+$ .

### Когерентная металлофизика

Обоснуем правомерность введения такого раздела физики. По определению металлофизика – раздел физики, в котором исследуется электронное и атомно-кристаллическое строение металлов и сплавов, изменения этого строения в результате внешнего воздействия и связь внутреннего строения металлов и сплавов с их свойствами. Понятие когерентности введено при объяснении интерференции света. Оказалось, что интерференция присуща волнам любой природы. Волны, излучаемые независимыми источниками (атомами) не когерентны. Однако, когда две или несколько волн, излученных одним атомом, встречаются, пройдя различные пути или через разные среды, то они когерентны. Интерференция волн деформации

<sup>6</sup> Электронные процессы, связанные с возникшей разностью потенциалов металл-диэлектрик ради краткости не рассматриваются.

в металлах и сплавах продемонстрирована в работе [4] на многочисленных примерах на микро-, мезо- и макроуровнях. Таким образом, введение такого раздела носит лишь терминологический характер, ибо когерентностью обусловлена интерференция волн.

Проанализируем возможности использования достижений когерентной физики и химии для решения проблемы усталости металла.

Мы будем исходить из следующего.

Существующие методы мониторинга, в том числе ультразвуковые и электромагнитные, дают лишь слабое представление о развитии усталости, а нередко неверную оценку состояния металла. Но изменения параметров металла связаны с циклическим воздействием на него. Существует много определений того, что такое усталость. Ограничимся тем, которое дано в стандарте США.

ASTM E 1150 (USA Standard): Усталость есть процесс непрерывных локальных структурных изменений, происходящих в материале в результате изменения напряжений и деформаций, заканчивающийся трещиной или разрушением. (Курсив мой).

Дополним это определение.

*Под катастрофической усталостью металла понимается такое его состояние, при котором любое, ранее допустимое, воздействие может стимулировать выделение мощности достаточной для внезапного разрушения некоторых элементов технического устройства, обеспечивающих его работоспособность.*

Итак, под усталостью подразумевается макроскопическая статистическая характеристика металла

Но нам необходимо понять, что происходит не со всем металлом, а буквально с каждым отдельным его атомом.

### **Атомы и волны**

Давая оценку идеям Фарадея, Эйнштейн писал: “Надо иметь могучий дар предвидения, чтобы распознать, что в описании электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а скорее пространство между ними”. (Курсив мой) Работы Эйнштейна расширили представления о пространстве, а благодаря достижениям физики 20-го столетия стало ясно, что материя существует в форме вещества и поля, что частицы обладают волновыми свойствами, а волны квантовыми. Автор глубоко убежден в том, что без учета межатомного взаимодействия не могут быть созданы методики и устройства количественной оценки усталости металла.

Обоснуем этот вывод тремя примерами.

1. Три партии монокристаллических цинковых проволочек одинакового диаметра подвергались растяжению вплоть до разрыва [53]. В первой партии поверхность проволочек оставалась чистой, во второй-на нее электролитически наносился тонкий слой олова, в третьей-свинца. Диффузии олова и свинца в цинк не обнаружено. Характер разрыва оказался следующим: предельная нагрузка чистой проволочки и проволочки, покрытой свинцом, оказалась одинаковой и разрыв пластичным, у проволочки, покрытой оловом, разрыв был хрупким, а предельная нагрузка в 8-10 раз ниже.
2. Предельная нагрузка вискера железа диаметром 1-2 мкм оказалась в 20-25 раз выше, чем у вискера диаметром 15-20 мкм [54].
3. При растяжении нанопроволочки из золота до диаметра в один атом электропроводность достигала значения  $G_0 = e^2/2h$  и не менялась вплоть до разрыва, который произошел после растяжения еще на 20 Å [55].

Естественно, возникают вопросы:

1. Каким образом атомы цинка «узнают» состав поверхности и соответствующим образом «реагируют» на деформацию?

2. Почему увеличение диаметра вискера приводит к уменьшению прочности?

3. Почему образуется плато электропроводности нанопроволочки, толщиной в один атом, при растяжении ее на расстояние, равное пяти постоянным кристаллической решетки?

1. Единственным способом «обмена информацией» между атомами на таком расстоянии являются волны. При изменении свойств поверхности характер распространения волн и их взаимодействия с атомами цинка изменился, изменились и атомы.

2. Изменение диаметра вискера приводит к изменению условий образования стоячих волн, а следовательно, перераспределению максимумов и минимумов интерференции и изменению характера взаимодействия.

3. Сохранение электропроводности при столь значительном увеличении межатомного расстояния свидетельствует об изменении вида связи между атомами.

Вся совокупность свойств металлов свидетельствует о том, что деформация играет для совокупности атомов ту же роль, что и лазер накачки для отдельного атома. Отсюда следует, что

**процессы, предшествующие разрушению металла, могут быть исследованы теми же фемтометодами, что и химические реакции.**

Экспериментально установлено, что зарождение микротрещин начинается у микроскопических объектов, называемых оптически черными областями (Optical Dark Area, ODA). В большинстве случаев такие области формируются вблизи неметаллической примеси и имеют размер 0,5-300 мкм. Некоторые из них показаны на рисунке 13 (1, 2) [57, 58]. Однако нередки случаи, когда ODA является однородной, Рис. 13.(3, 4, 6). Особый интерес представляет ODA, образованная атомами углерода Рис. 13 (5). Характерными особенностями ODA является их почти сферическая форма и, что очень важно, **трещины зарождаются вблизи ODA, но не пересекают их.** Вблизи ODA концентрируются атомы водорода, Рис. 13 (1, 2, 3, 4). Влияние водорода на свойства металлов хорошо известны, однако заметного воздействия на длину и число трещин вблизи ODA водород не оказал. Следует отметить, что такой вывод сделан на основе известных автору публикаций, в том числе приведенных выше, однако статистического материала может оказаться недостаточно.

Для образования трещины необходимо совершить определенную работу. Следовательно, трещина есть та область, в которой произошло поглощение энергии. Скачкообразный характер образования трещины свидетельствует о том, что необходимая энергия была выделена источником скачкообразно. Единственным таким источником представляется переход электронов в атомах с более высоких энергетических уровней на нижние. Максимальная энергия в этом случае выделяется при рекомбинации ионов. Следовательно, в ODA имеются избыточные электроны, тогда как в ее окрестности их недостаточно. Таким образом, ODA является катодом, а ее окрестность-анодом. При определенных условиях возникает самостоятельный или несамостоятельный разряд и электроны устремляются по каналу, имеющему максимальную проводимость. Максимальное число ионов и электронов рекомбинирует на внешней границе ODA. По мере истощения электронов ширина трещины убывает. **Обратим внимание на то, что при образовании трещины вблизи ODA происходят процессы обратные тем, которыми обусловлено образование питтингового дефекта.** В данном случае ODA выступает в качестве катода. Разумеется, для разрыва связи металл-кислород в ПД требуется значительная энергия, однако в данном случае происходит обмен

электронами между атомами одного элемента, расположенными в различных кластерах. Как было показано [60, 61], потенциал ионизации и сродство к электрону в кластерах отличается от потенциала ионизации и сродства к электрону свободных атомов. Эти параметры не только различны для катионного и анионного кластеров, но и зависят от числа атомов в кластере. Одновременно с образованием ОДА в металле, подвергнутом циклической деформации, формируются сферически симметричные области, получившие название рыбьий глаз. Разрушение типа рыбьий глаз будет рассмотрено в отдельной работе..

#### **Диагностика усталости металла.**

В данном параграфе автор поставил перед собой задачу ответить на три вопроса:

1. Для чего искать?
2. Что искать?
3. Как искать?

Выяснилось, что, расположив вопросы в таком порядке, легче сформулировать ответы на них. Главная цель данной статьи предотвратить возможные катастрофы. И не имеет значения предотвращена ли она на основе правильной теории или ошибочной. Формулами Френеля в оптике пользуются до сих пор, хотя выведены они на основе упругой теории света, которая оказалась несостоятельной. История человечества свидетельствует о том, что технологии зачастую на много лет опережают теорию. Таких примеров можно привести множество. Это египетские пирамиды, делийский столб, дамасская сталь, скрипки Страдивари, краски Рембранта и т.д.

Такая ситуация сложилась и сегодня-нанотехнология значительно опережает нанотеорию. После открытия фуллерена огромный интерес вызвали нанотрубки. Не утихают споры о том, кем были они получены ранее, но разница во времени составляет несколько лет. По мнению автора нанотрубки были получены за несколько столетий до этого вместе с изобретением графитового карандаша. Это были те невероятно твердые частицы, которые царапали бумагу и портили качество карандаша. Свойства металла, помещенного в нанотрубку, существенно отличаются от свободного металла. Экспериментально это было обнаружено раньше, чем предсказано.

1. Исходя из этого можно ответить на второй вопрос. Из криминалистики известно, что исполнителя преступления легче поймать, чем заказчика. Внезапный скоротечный характер катастрофического разрушения свидетельствует о том, что процесс носит стимулированный характер. Какой-то сигнал (деформация, вызванная определенным колесом поезда, блуждающий ток, порыв ветра и т.п.) выступает, образно говоря, как последняя капля.

Выяснив что предствляет собой этот сигнал, можно предотвратить катастрофу.

Для этого атомам нужно посылать такой сигнал до того, как в металле накопится энергия, достаточная для разрушения.

Множкратно изгибая стержень, мы не только заставляем атомы совершать более интенсивные колебания (металл нагревается), но и изменяем их. Чаще всего атомы посылают нам сигналы, которые мы не видим и не слышим, При каком-то изгибе металл дает трещину. Но при изгибе стержня из чистого олова частота сигналов лежит в той области, в которой человек слышит.

На рисунке 12 [56] показаны результаты исследования акустической эмиссии, возникающей при ударе, пластической деформации и разрушении. Хорошо видно, что они различны.

**Следовательно, нужно научиться использовать подобные волны.**

Хочется верить, что изучение волн деформации олова—есть кратчайший путь к решению этой задачи. Оно уже дважды предоставило науке такую возможность своими загадочными свойствами: оловянной чумой и образованием вискерров при взрыве. Вполне вероятно, что влияние олова на свойства цинка еще один путь. Обратим внимание на то, что сигналы меггерцовых частот не разрешены, но модулированы какой-то частотой. Установлено, что при кристаллизации (значит и при рекристаллизации) возникают гиперзвуковые волны. Следовательно, нужны исследования всего спектра акустических волн, чтобы выяснить какие волны стимулируют катастрофическое выделение энергии, а какие только сигнализируют об изменениях. Кроме того, акустическая эмиссия сопровождается электромагнитными волнами.

Проблема стимулятора катастрофического разрушения должна рассматриваться при проектировании технических сооружений. Этому обязывает печальный опыт. Разрушение зданий Торгового центра в Нью Йорке 11 сентября 2001 г. свидетельствует о том, что выделение энергии носило стимулированный характер. Стимулятором в этом случае явился удар самолетов.

2. В настоящее время известны различные методы неразрушающего контроля нефтепроводов, рельсов, обсадочных труб как акустическим, так и электромагнитными методами. При этом выявляются, подчас, многочисленные близко расположенные трещины, которые не привели к катастрофе, тогда как разрыв произошел в том месте, которое казалось надежным. Это означает, что данный метод мониторинга оказался «слепым» по отношению к более опасным дефектам.

3. Как отмечалось выше, серьезную опасность представляют области с низким или нулевым значением модуля сдвига. Они локализованы на узком участке сооружения. Следовательно, должны быть разработаны методы сканирования таких участков, используя, например, методы определения скорости сдвиговых волн.

4. . Учитывая размер дефектов, «увидеть» их способны лишь волны, частота которых составляет  $10^8$ - $10^{10}$  Гц, т.е. на два-четыре порядка выше той, которая использована в работе [56]. В этом случае будет достигнуто разрешение той области спектра, которая несомненно несет важную информации, но представляется сплошной.

5. Установлено, что одной из причин ослабления металла является декарбонизация. Более того, при ударном воздействии<sup>7</sup> происходит интенсивная диффузия углерода в сплав и равномерная концентрация нарушается. Методы автордиографии и существование долгоживущего изотопа  $^{14}\text{C}$  позволяют следить за изменением структуры в особо опасных участках.

6. Автоматический контроль смещения элементов креплений легко осуществим. После сигнала о смещении, деталь, которая может быть **извлечена и заменена должна быть исследована всеми современными методами**. Смещение детали, заменившей предыдущую, уже грозное предупреждение об активизации процессов. Исследование детали и контактирующих с ней элементов позволит выработать стратегию дальнейших действий.

7. Учет динамических нагрузок является обязательным не только при проектировании технического сооружения, но и при его эксплуатации. Но при современных методах мониторинга не учитывается то, что линейный (балка, рельс), плоский (фюзеляж) или объемный элемент являются прекрасными одномерными,

<sup>7</sup> Взаимодействие колеса на рельс равносильно удару.

двумерными или трехмерными волноводами, в которых возможна интерференция и дифракция.

8. Приведенные выше примеры показывают, что пренебрежение этими явлениями приводит к катастрофическим последствиям. Место, в котором чаще всего наблюдаются повреждения, народная молва называет проклятым, не зная, что в нем наиболее активно происходят процессы, приводящие к разрушению. Такие места могут быть выявлены, используя бегущие и отраженные волны.

9. Применение лазерного мониторинга состояния металла, подобного накачка-зондирование, может показаться нереальной, как совсем недавно казалась сама фемтохимия. Однако такое применение не противоречит фундаментальным законам физики, а значит возможно. Более того, обратим внимание на то, что пленка олова оказала существенное влияние на свойства цинка. Следовательно, и цинк оказал определенное влияние на пленку олова, но это не исследовано. Не исключено, что может быть создана такая пленка, которая будет сигнализировать об изменениях в металле. Поручкой тому является тот факт, что при разрушении металла возникают не только акустические, но и электромагнитные волны, в том числе в световом диапазоне [59].

10. Автор не претендует на полноту возможных методов мониторинга усталости металла. Более того, новые методы должны сочетаться с уже известными, хорошо себя зарекомендовавшими.

11. Интенсивное строительство новых технических сооружений, увеличение скорости транспортных средств диктуют необходимость научного поиска и создания технических устройств, способных контролировать атомные и волновые процессы в объектах.

Автор выражает глубокую благодарность профессору Г.П. Фетисову за полезные советы и плодотворную дискуссию.

#### Литература

1. V.P. Rombakh, *Украинский физический журнал*, **45**, 1423 (2000); **46**, 40 (2001) (In English).
2. В.П. Ромбах, *Загадочные катастрофы технических конструкций и организмов, Всеукраинская техническая газета №№ 39-49* (2004),
3. В.П. Ромбах, *Технология металлов*, **7**, 23; **8**, 15; **10**, 12 (2004).
4. V.P. Rombakh, *Atom Parameters and Metal Properties*, Logistic Capital, Inc. Edmonds, USA (2008).
5. <http://www.obozrevatel.com/news/2007/11/12/201028.htm>
6. <http://www.a-video.com-50's%20Newsreel-ship/>
7. Allen Brisson-Smith for the New York Times Published: August 3.2007.
8. [http://www.scribd.com/doc/222498/94-Fracture-Critical-Bridge-Inspection-September-1994?ga\\_related\\_doc=1/](http://www.scribd.com/doc/222498/94-Fracture-Critical-Bridge-Inspection-September-1994?ga_related_doc=1/)
9. [http://www.scribd.com/doc/222499/95-Fracture-Critical-Bridge-Inspection-October-1995?ga\\_related\\_doc=1/](http://www.scribd.com/doc/222499/95-Fracture-Critical-Bridge-Inspection-October-1995?ga_related_doc=1/)
10. [http://www.scribd.com/doc/222500/96-Fracture-Critical-Bridge-Inspection-July-1996?ga\\_related\\_doc=1/](http://www.scribd.com/doc/222500/96-Fracture-Critical-Bridge-Inspection-July-1996?ga_related_doc=1/)

11. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/97fracture-critical-bridge-inspection\\_august-1997.pdf](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/97fracture-critical-bridge-inspection_august-1997.pdf)
12. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/98fracture-critical-bridge-inspection\\_september-1998.pdf/](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/98fracture-critical-bridge-inspection_september-1998.pdf/)
13. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/99fracture-critical-bridge-inspection\\_april-1999.pdf/](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/99fracture-critical-bridge-inspection_april-1999.pdf/)
14. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/00fracture-critical-bridge-inspection\\_april-2000.pdf](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/00fracture-critical-bridge-inspection_april-2000.pdf)
15. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/01fracture-critical-bridge-inspection\\_september-2001.pdf](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/01fracture-critical-bridge-inspection_september-2001.pdf)
16. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/02fracture-critical-bridge-inspection\\_may-2002.pdf](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/02fracture-critical-bridge-inspection_may-2002.pdf)
17. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/03fracture-critical-bridge-inspection\\_june-2003.pdf/](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/03fracture-critical-bridge-inspection_june-2003.pdf/)
18. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/04fracture-critical-bridge-inspection\\_june-2004.pdf/](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/04fracture-critical-bridge-inspection_june-2004.pdf/)
19. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/05fracture-critical-bridge-inspection\\_june-2005.pdf/](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/05fracture-critical-bridge-inspection_june-2005.pdf/)
20. [http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/06fracture-critical-bridge-inspection\\_june-2006.pdf/](http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/06fracture-critical-bridge-inspection_june-2006.pdf/)
21. Silva L.M. Gonçalves, J.P. Oliveira, F M F de Castro, *Multiple Site Damage in Riveted Lap-joint Specimens*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, [http://paginas.fe.up.pt/Lucas\\_Albuq/](http://paginas.fe.up.pt/Lucas_Albuq/)
22. D.G. Harlow and R.P. Wei, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* **24**, 523 (2001).
23. Accident of an Hercules C130A from Hawkins and Powers Aviation Walker, California, USA (17th June, 2002).
24. «Еще раз о трагедии в аквапарке «Трансвааль Парк».  
С.О.К. N 6 | 2004г. Рубрика: КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ.
25. <http://www.railwaysarchive.co.uk/eventsummary.php?eventID=143>
26. Transverse Fissure Detector Car. By Harcourt C., *Drake Associate A.I.E.E. N.Y.* (1931).
27. H. Tanigava, H. Abe, S. Jitshikawa, T. Iwai, H. Serisawa, Katoh Yutai. *Japan. Atomic Energy Research Institute –Rev. #024*, 130 (2000).
28. J.P Hirth *Microstructure and Mechanical Properties of Metals, Advancing Materials Research*, 111(1987).
29. W.Sigle, L.-S. Chang, and W. Gust, *Philosophical Magazine A*, **82**, 1595(2002).
30. <http://lateralthunting.com/C60/C60.html/>
31. Е.А. Шур Разрушение рельсового пути, Москва, Транспорт (1971).
32. S-i. Nishida, K. Sugino, C.Ukashima and H. Masumoto. *Bulletin of JSME*, **28**, No 243, 1819 (1985).
33. <http://www.hseresearchprojects.com/projectsearch.aspx?id=71>
34. Train Derailment at Potters Bar 10 May 2002 a Progress Report by the HSE I Investigation Board May 2003.
35. <http://www.rail-reg.gov.uk/upload/pdf/incident-southalleast-210507.pdf>
36. <http://www.rail-reg.gov.uk/server/show/ConWebDoc.8554>.
37. <http://www.vz.ru/society/2008/1/16/138202.html>.
38. R.A. Smith, *The FESI Bulletin of Structural Integrity*, **2**,#2, 10 (2006)

39. И.М. Грязнов, К.И. Козорезов, Л.И. Миркин, Н.Ф. Скугорова, *ДАН СССР*, **194**, 70 (1970).
40. Б.П. Белоусов, *Сборник рефератов по радиационной медицине*, Москва, Медгиз, 145 (1959).
41. А.М. Жаботинский, *Биофизика*, **9**, 306, (1964); Концентрационные колебания. М.: Наука, 1974.
42. I Prigogine. *Science*, **201**, 1978, No 4358, 777 (1978); *УФН* **131**, 185 (1980).
43. A.H Zewail, *J. Phys. Chem.* **100**, 12701(1996).
44. A.H. Zewail. *Femtochemistry. Atomic scale dynamics of the chemical bond using ultrafast lasers, Nobel lecture* 8.12 1999.
45. C. Pinckt, M. Bölsher, H.H. Rotermund, A.S. Mikhailov, L. Organ, N. Budlansky, J.R. Scully, J.L. Hudson, *Science*, **305**, 1133 (2004).
46. H.H. Rotermund, H.Hunhch, Monika, M. Domhede, C.Punckt, and Cristian *Mikroskopische Untersuchungen von Korrosionsprozessen an Edelmetall*, Jahrbuch 2007, Frtz-Habor Institut, Berlin (German).
47. H. Böhni. *In Uhlig's Corrosion Handbook. Second Edition. Edited by R. Winston Revie. John Wile & Sons Inc.* 173 (2000).
48. <http://www.corrosion-doctors.org/Forms-pitting/aluminum-sample.htm/>
49. В.П. Ромбах, *Оптика и спектроскопия*, **9**, 258(1960); **10**, 683(1961).
50. Y. Murakami, *Comprehensive Structural Integrity- Fracture of Materials from Nano to Macro, Cyclic Loading and Fatigue*, Elsevier, **4**, 41 (2003).
51. *Corrosion Fatigue of Steam Turbine Blade Materials. Workshop Proceedings, Pato Alto, California*, 4 (1981).
52. S.S. Batsanov, *J. Phys. Chem. Solids*, **58**, 527 (1997).
53. В.И. Лихтман, Е.Д. Шукин, *УФН*, **66**, 213 (1958).
54. В.Г. Сыркин, *Материалы будущего. Виссеры*, Москва, Наука (1990).
55. A.I. Yanson, R.G.R. Bollinger, H.E. van den Brom, N. Agraït, and J.M. Ruitenbeek, *arXiv: cond-mar/9811093 v1 6 Nov 1998*.
56. H.A. Crostack, H.-D. Steffens, and A.-H.Engelhard, *Analitical and experimental fracture mechanics*, SIJTHJFF & NOORHOFF, 507 (1981).
57. T. Otsuka, H. Hitoshi, H. Nikshima, K. Sakamoto, M. Hayakawa, K. Hashizume, M. Sugasaki, *Fusion Science and Technology*, **48**, 708 (2005).
58. Y. Murakami, N.N. Youkoyama, and Nagata, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* **25**, 735 (2002).
59. К.Б. Абрамова, А.Б. Пахомов, Б.П. Перегуд, И.П. Щербаков, *Письма в ЖТФ* **9**, 769 (1983).
60. T.J. Marrow, H. Cetinel, M. Al-Zalman, S. Macdonald, P.J. Withers, and J. Walton, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* **25**, 635 (2002).
61. G. Wrigge, M.A. Hoffmann, and B. van Issendorff, *Phys. Rev. A* **65**, 063201 (2002);





Рис. 1. Раскол корабля в гавани [6].



AllenBrisson-Smith for The New York Times Published: August 3, 2007

Рис. 2 Разрушение моста № 9143 через реку Миссисипи [7].

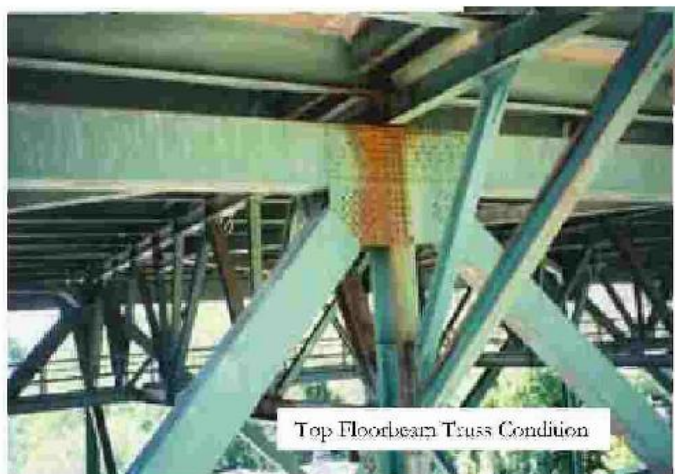


Рис. 3. Коррозия крепления одного из важнейших узлов моста [19].

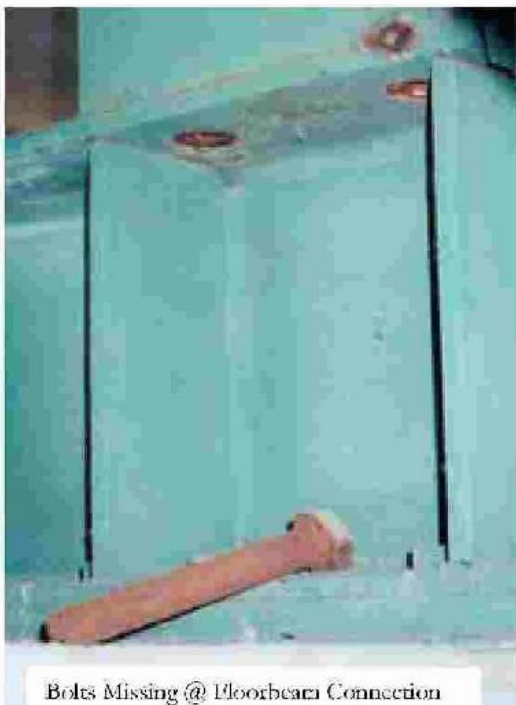


Рис. 4. Выпадение болтов из соединительного крепления [19].



Рис. 6. Изменение цвета поверхностей разрыва рельса (Hatfield, UK 2000) в процессе его хранения [25].

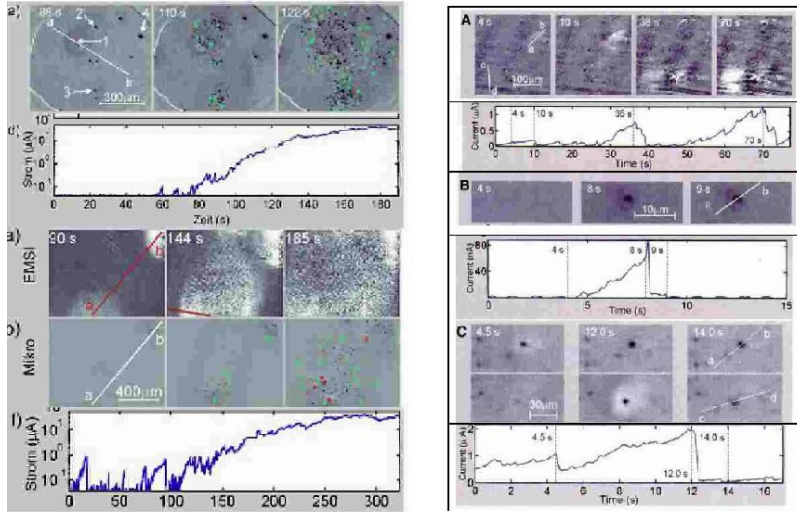


Рис. 7. Эллипсометрическое и микроскопическое исследование формирования питтинговых дефектов. Переходы активный дефект (красный)↔пассивный дефект (зеленый) сопровождаются осцилляцией тока [45, 46].

Uniform pitting

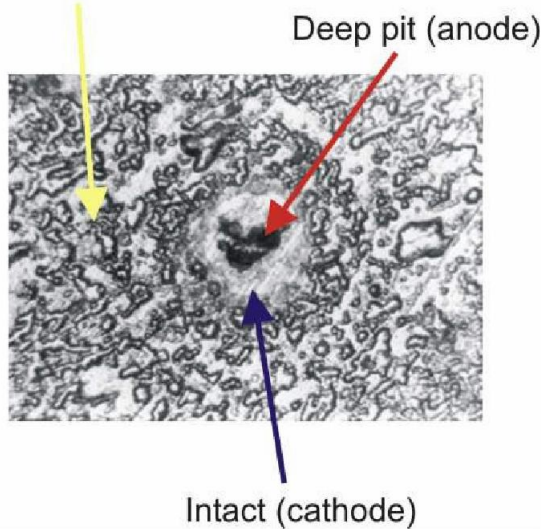


Рис. 8. Формирование макроскопического (диаметром ~1 мм) питтингового дефекта на поверхности алюминия в 3.5% растворе NaCl [48].

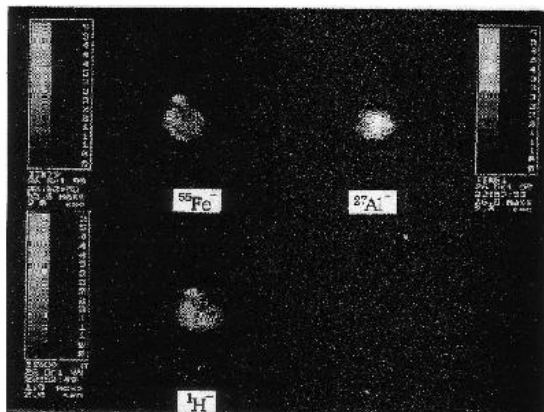


Рис.9. Отрицательные ионы  ${}^1\text{H}$ ,  ${}^{27}\text{Al}^-$  и  ${}^{56}\text{Fe}^-$  в металле, выявленные методом вторично-ионной масс-спектропии [50].



Рис. 10. Коррозия лопатки паровой турбины [51].

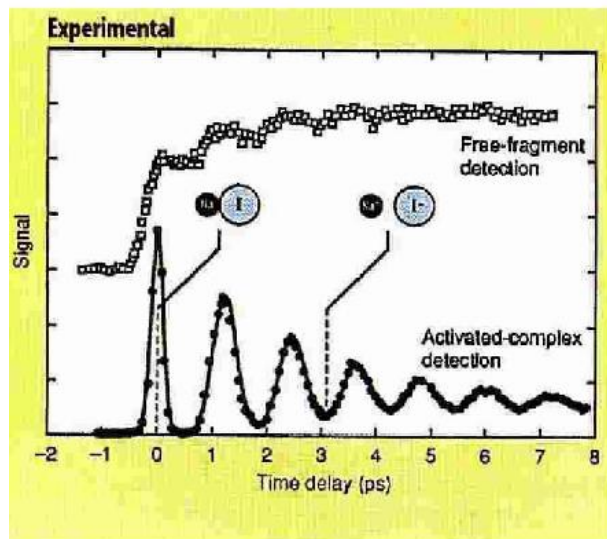


Рис. 11. Фемтохимия реакции NaI.  
Осцилляции ионной и ковалентной связей [57, 58].

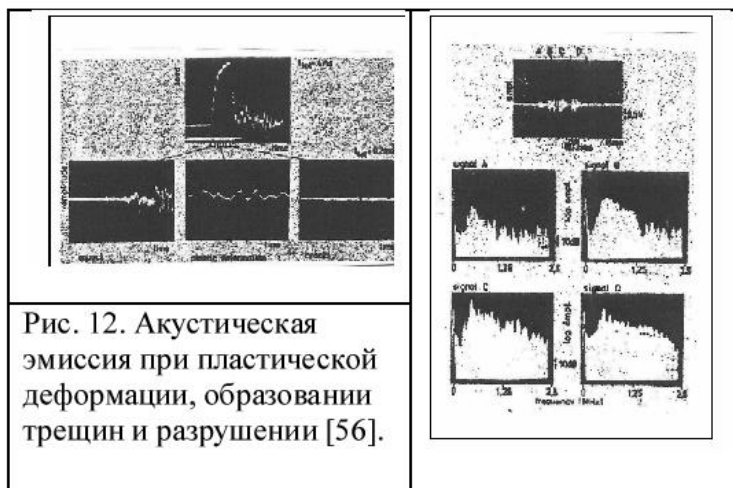
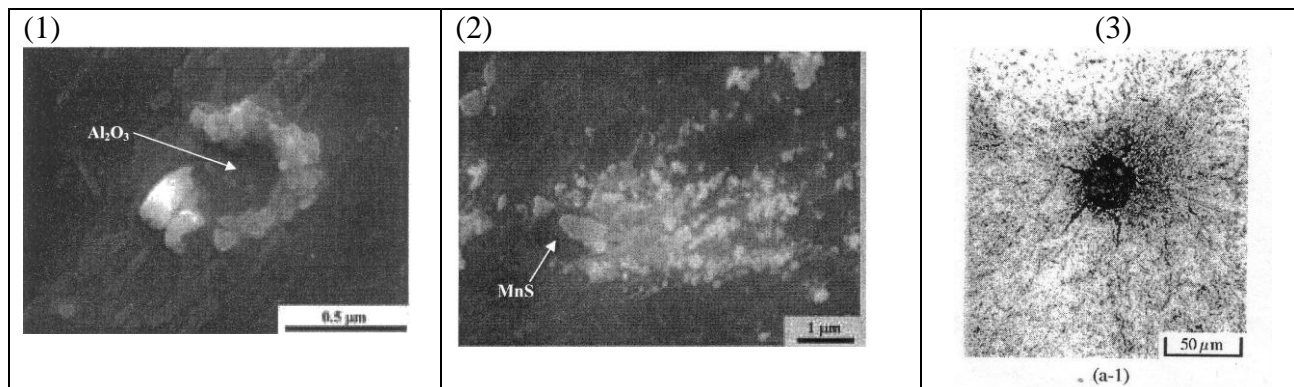


Рис. 12. Акустическая  
эмиссия при пластической  
деформации, образовании  
трещин и разрушении [56].



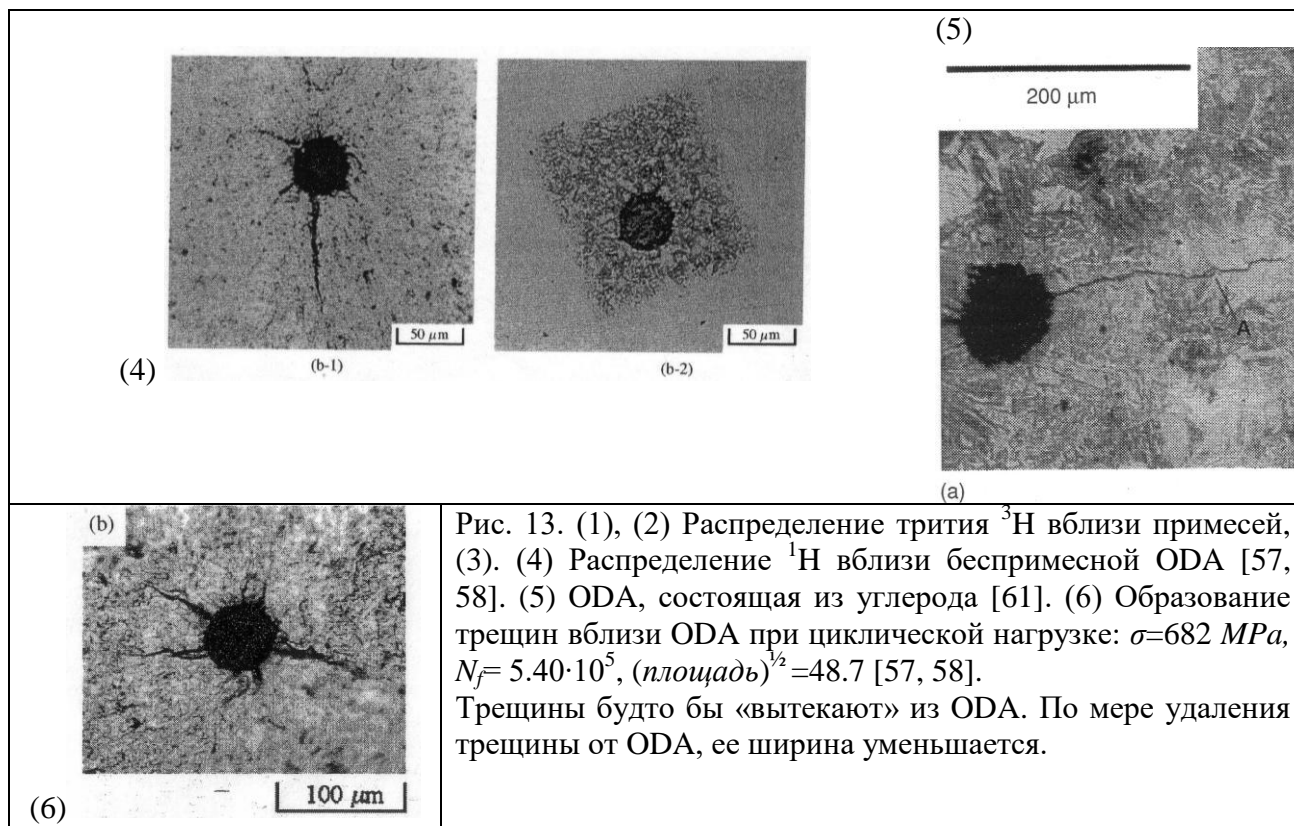


Рис. 13. (1), (2) Распределение трития  $^3\text{H}$  вблизи примесей, (3). (4) Распределение  $^1\text{H}$  вблизи беспримесной ODA [57, 58]. (5) ODA, состоящая из углерода [61]. (6) Образование трещин вблизи ODA при циклической нагрузке:  $\sigma=682\ \text{MPa}$ ,  $N_f=5.40\cdot 10^5$ ,  $(\text{площадь})^{1/2}=48.7$  [57, 58].

Трещины будто бы «вытекают» из ODA. По мере удаления трещины от ODA, ее ширина уменьшается.

(6)

100  $\mu\text{m}$