



Всё ломается

Почему мост, простоявший сорок лет, падает в обычный вторник, и что инженер имеет в виду под словом «надёжно»



Техника · 13–17 лет · 13 минут

Деталь не изнашивается равномерно и не разрушается от одной большой нагрузки. Она копит невидимые трещины от нагрузок, каждая из которых сама по себе безопасна. Из этого следует всё остальное: сроки службы, техосмотры и слово «ресурс».

Вопрос, который звучит наивно

Почему вещи ломаются?

Первый ответ: их слишком сильно нагрузили. Положили больше, чем выдерживает, — оно и не выдержало.

Ответ правильный, но объясняет меньшинство случаев. Куда чаще бывает иначе: деталь годами работает под нагрузкой, на которую рассчитана с запасом, ничего не превышает, и вдруг ломается. Мост, по которому сорок лет ездили тяжелее, падает под обычным грузовиком. Ось, выдерживавшая тонны, ломается на ровном месте.

Значит, есть что-то, что накапливается. Разберёмся, что именно — и почему из этого следует устройство техосмотров, сроков службы и слова «ресурс».

Скрепка, которая всё объясняет

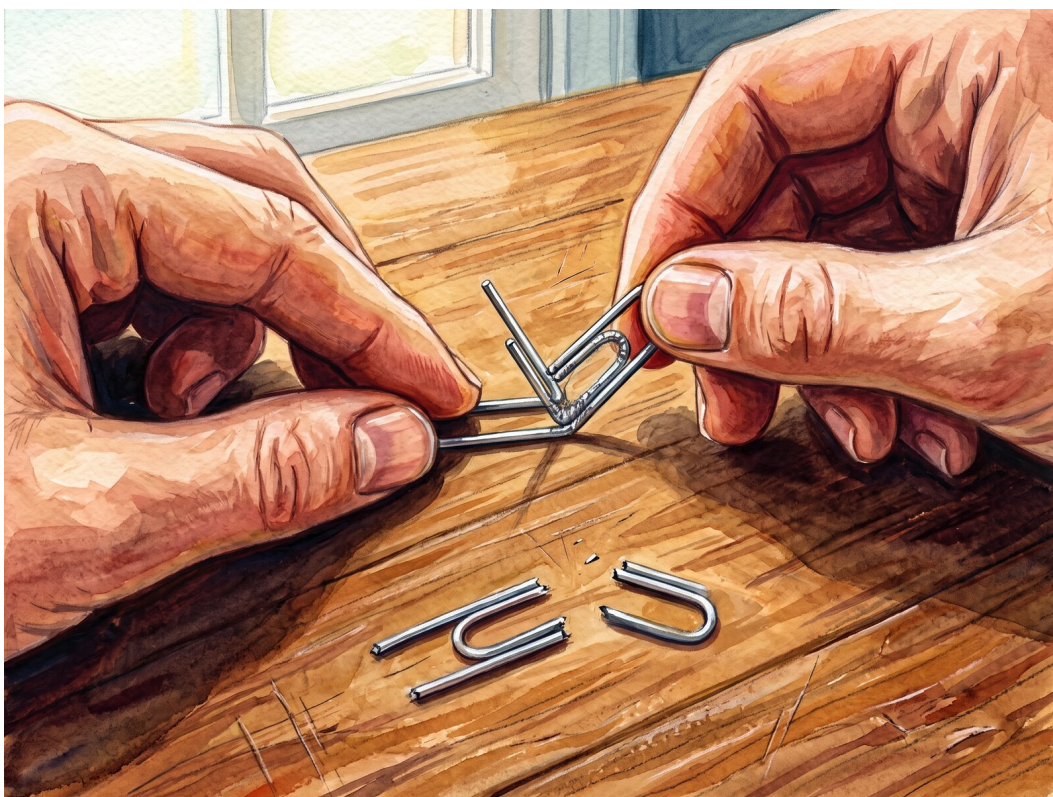
Возьми канцелярскую скрепку. Разогни и попробуй разорвать руками, просто потянув. Не выйдет: прочности проволоки хватает с большим избытком.

Теперь согни её в одном месте и разогни обратно. Ещё раз. Ещё.

На пятнадцатом-двадцатом разе она переломится сама, без усилия.

Посмотри, что произошло. Сила, которую ты прикладывал, ни разу не приближалась к той, что нужна для разрыва. Каждое отдельное сгибание было совершенно безопасным. Опасным оказалось их **количество**.

Это и есть усталость материала — главная причина разрушений в технике. Не перегрузка, а повторение.



Скрепка ломается не от силы, а от количества

Усталость материала

Накопление повреждений в материале при многократно повторяющихся нагрузках, каждая из которых значительно ниже разрушающей. Явление обнаружили в XIX веке на железнодорожных осях: они ломались после долгой исправной службы, и это выглядело настолько необъяснимо, что первое время всерьёз считали, будто металл «устаёт» и «кристаллизуется» от езды. Название осталось от той ошибочной догадки, а механизм оказался другим.

Что происходит внутри

Металл кажется сплошным, но внутри он не идеален. Всегда есть мелкие неоднородности: микроскопическая пора от литья, включение примеси, царапина от инструмента, острый внутренний угол.

При каждом нагружении вблизи такого места напряжение оказывается выше, чем в среднем по детали, — материал там как бы работает за соседей. Это называют концентрацией напряжений, и отсюда следует правило, которое пронизывает всю инженерию: **острый угол опаснее большой нагрузки**.

Каждый цикл продвигает микротрещину на ничтожную величину — доли микрона. Тысячу циклов спустя трещина всё ещё невидима. Миллион спустя — уже различима на приборе. И вот здесь начинается самое неприятное.



Трещина растёт медленно, а потом мгновенно

Трещина растёт не равномерно. Чем она длиннее, тем сильнее концентрируется напряжение на её кончике, тем быстрее она растёт, тем длиннее становится. Петля с положительной обратной связью: рост разгоняет сам себя.

Поэтому у разрушения такой характерный вид на графике. Девяносто процентов времени — почти горизонтальная линия, ничего не происходит. Потом за короткое время всё.

Вот откуда берётся ощущение внезапности. Разрушение не было внезапным — оно готовилось годами. Внезапным был только последний участок.

Самолёты, которые разваливались в воздухе

В 1954 году у британской компании произошла катастрофа, ставшая учебником для всей отрасли.

«Комета» была первым в мире реактивным пассажирским лайнером — гордостью британской промышленности, красивой и быстрой машиной, обогнавшей конкурентов на годы. В январе один такой самолёт разрушился в воздухе над Средиземным морем. Через три месяца — второй, почти так же.

Причину искали долго. Обломки поднимали со дна, а целый самолёт того же типа поместили в огромный бассейн и стали качать в нём давление, имитируя взлёты и посадки, — раз за разом, тысячи циклов.

Фюзеляж лопнул. Трещина пошла от **угла окна**.

Окна у «Кометы» были прямоугольные, с довольно острыми углами. В каждом полёте корпус слегка раздувался от разницы давлений и снова сжимался при снижении. Само по себе безопасно — с большим запасом. Но в углу окна напряжение концентрировалось в несколько раз сильнее, чем в среднем по обшивке, и каждый полёт продвигал невидимую трещину.

Конструкторы не были невеждами. Прочность они считали правильно, и на статическую нагрузку самолёт выдерживал многократный запас. Они не учли не силу, а **повторение**: то, что тысяча безопасных циклов складывается в опасность.

Именно после этой истории иллюминаторы стали круглыми и овальными. Посмотри в следующий раз на окно самолёта — у него скруглённые углы, и это прямое следствие двух катастроф 1954 года.



Прямоугольные окна «Кометы» стали причиной, которую никто не предвидел

Что значит «сделать надёжно»

Надёжно — значит с большим запасом. Считай худший случай, умножай на три и не думай. Так строили мосты в XIX веке, и многие из них стоят до сих пор, пережив расчётные нагрузки многократно.

Надёжно — значит с известным сроком. Запас невозможно наращивать бесконечно: тяжёлый самолёт не взлетит, толстый мост рухнет под собственным весом. Современный подход — считать ресурс: деталь живёт заданное число циклов, потом её меняют независимо от вида. Прочность заменяется расписанием.

Расхождение принципиальное. Первый подход говорит «оно не сломается», второй честно признаёт «оно сломается, вопрос когда» — и строит вокруг этого признания всю эксплуатацию.

Почему нельзя просто сделать всё покрепче

Наивное решение — делать детали потолще — не работает, и полезно понять почему.

Вес тянет за собой вес. Утолстил крыло — самолёт стал тяжелее — нужно больше подъёмной силы — нужно крыло ещё больше. В авиации эту спираль называют ростом массы, и она съедает выигрыш.

Запас маскирует незнание. Огромный коэффициент запаса часто означает не надёжность, а то, что конструктор не понимает, что происходит в его детали. Он перестраховывается вслепую — и вполне может перестраховаться не в том месте, оставив слабым другое.

Прочность и живучесть — разные свойства. Очень прочный материал часто хрупок: он держит большую нагрузку, но трещина в нём бежит мгновенно. Менее прочный, зато вязкий, трещит медленно и даёт шанс заметить. Для конструкции, которую осматривают, второе бывает ценнее первого.

Отсюда современный принцип, который стоит знать: конструкцию проектируют так, чтобы **разрушение было обнаружимым до того, как станет опасным**. Не «чтобы не треснуло», а «чтобы трещина успела вырасти до заметного размера прежде, чем достигнет критического». Осмотры назначают в промежуток между этими двумя точками.

Как это находят, пока не поздно

Раз разрушение готовится долго и незаметно, весь вопрос в том, чем смотреть. Из этого выросла целая область — контроль без разрушения детали.

Красящая жидкость. Самый простой способ: поверхность смачивают жидкой краской, она затекает в трещину капиллярными силами, излишки стирают, а потом наносят проявитель — белый порошок, который вытягивает краску обратно наружу. Невидимая трещина проступает яркой линией. Дёшево и работает только с поверхностными дефектами.

Магнитный порошок. Стальную деталь намагничивают и посыпают мелким железным порошком. У трещины магнитное поле выходит наружу, и порошок собирается вдоль неё — тот же эффект, что с опилками у магнита, только вместо полюсов дефект.

Ультразвук. В металл посылают короткий импульс и слушают эхо. Отражение приходит от дна детали — и от трещины, если она есть, причём по задержке видно, на какой глубине. Ровно тот же приём, которым просвечивают планету сейсмическими волнами и человека на УЗИ.

Датчики, которые не снимают. На крупных сооружениях ставят постоянные измерители деформации и передают показания непрерывно. Тогда осмотр перестаёт быть событием раз в год и становится потоком.

Заметь общее во всех способах: ни один не измеряет прочность. Все они ищут **признак начавшегося процесса**. Инженер давно не спрашивает «выдержит ли»; он спрашивает «на каком участке кривой мы сейчас».

Что из этого следует

Несколько выводов, которые выходят далеко за пределы железа.

Срок службы — не выдумка продавца. Когда на детали написано «ресурс двести тысяч километров», это не заговор, чтобы ты купил новую. Это означает: на этом числе циклов расчётная вероятность трещины перестаёт быть приемлемой.

Осмотр важнее прочности. В системе, которую регулярно проверяют, можно позволить себе меньший запас — и получить более лёгкую, дешёвую и удобную вещь. Отказ от осмотров не экономит, а переносит риск на потом.

Внезапного не бывает. Почти всегда, когда что-то «вдруг» разрушилось, был долгий тихий участок, который никто не смотрел. Это верно и про технику, и про всё, что устроено похоже.

Острые углы опасны. Смотри на вещи вокруг: у надёжно сделанного предмета в местах перехода стоят скругления, а не углы. Это самый заметный след инженерной культуры в бытовых вещах.

Ломается не только железо

Последнее наблюдение, ради которого весь разговор и стоит держать в голове.

Схема «много мелких безопасных нагрузок, невидимое накопление, долгий ровный участок, потом резко» описывает далеко не только металл.

Человек не выгорает от одного тяжёлого дня — он выгорает от трёхсот обычных, каждый из которых по отдельности был вполне переносимым. Дружба редко кончается от одной ссоры: обычно к громкой ссоре уже подведена длинная трещина из мелких, о которых никто не вспомнит. Здание, город, привычка — везде то же самое.

И выводы переносятся вместе со схемой. Смотреть надо не на то, выдержишь ли ты сегодняшнюю нагрузку, — почти наверняка выдержишь. Смотреть надо на **количество циклов и на то, есть ли у тебя способ заметить трещину**. Регулярный осмотр важнее большого запаса — потому что запас однажды кончится незаметно, а осмотр даст знать заранее.

Оговорка, впрочем, нужна и тут. Аналогия — не доказательство: люди, в отличие от стали, восстанавливаются, и отдых действительно уменьшает накопленное. Металл так не умеет.

Главное в трёх строчках

- Большинство разрушений происходит не от чрезмерной нагрузки, а от накопления повреждений при повторяющихся безопасных нагрузках — это усталость материала.
- Трещина растёт сначала незаметно и очень долго, потом стремительно, поэтому поломка выглядит внезапной, хотя готовилась годами.
- Современная инженерия не обещает, что деталь не сломается: она назначает ресурс и строит осмотры в промежутке между «трещину уже видно» и «трещина уже опасна».

Вопросы для размышления

- Почему увеличение запаса прочности не решает задачу, а иногда делает конструкцию хуже?
- Круглые иллюминаторы придумали после катастроф. Почему конструкторы «Кометы», зная сопротивление материалов, всё-таки не предусмотрели этого?
- Где ещё, кроме техники, ты видишь устройство «долгий незаметный участок, а потом резко»? Что играет роль осмотра в этих случаях?