

Анализ повреждений машинных валов

По мере модернизации промышленности кажется, что службы эксплуатации все меньше сталкиваются с повреждениями машинных валов. Тем не менее, когда валы **действительно** выходят из строя, теорий о предполагаемых причинах поломки почти всегда столько же, сколько задействовано человек.



Независимо от того, связан ли анализ повреждений вала с двигателями, насосами или другими видами промышленного оборудования, его часто неправильно понимают, считают сложным и дорогостоящим. Однако для большинства машинных валов анализ должен быть относительно простым. Это связано с тем, что обычно из характера повреждения можно сделать убедительные выводы о виде и величине сил, воздействующих на вал, а также о направлении их действия: затем анализ поврежденных деталей покажет, что именно произошло.

Существует только четыре основных механизма повреждений: коррозия, износ, перегрузка и усталость. Первые два – *коррозия и износ* – почти никогда не приводят к повреждениям машинного вала, а если в редких случаях все-таки приводят, остаются очевидные доказательства. Из двух других механизмов усталостные разрушения встречаются чаще, чем повреждения вследствие перегрузки. (**Примечание:** следует иметь в виду, что во многих случаях к повреждению вала приводит совместное действие коррозии и усталостной нагрузки.) Данная статья посвящена повреждениям, возникающим вследствие действия факторов перегрузки и усталости.

Повреждения вследствие перегрузки

Повреждения вследствие перегрузки вызваны силами, превышающими предел текучести или предел прочности материала на разрыв. Как показано на рисунке 1, внешний вид повреждения вследствие перегрузки зависит от того, является ли материал вала хрупким или пластичным.

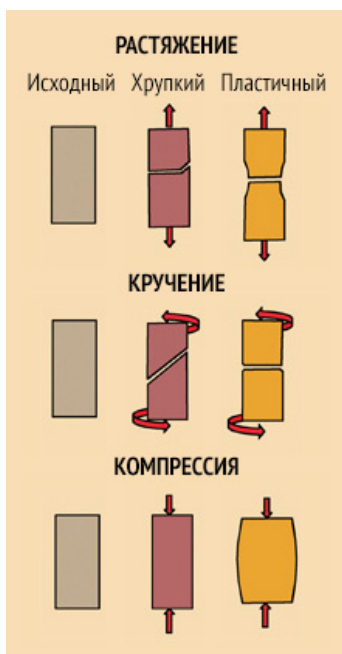


Рисунок 1. Внешний вид повреждения вследствие перегрузки зависит от того, является ли материал вала хрупким или пластичным.

Ни один материал вала не является абсолютно хрупким или абсолютно пластичным. Валы, используемые почти во всех двигателях, редукторах и вентиляторах, сделаны из низко- или среднеуглеродистой стали и являются относительно пластичными. В результате, при воздействии на такие материалы максимальной перегрузки они скручиваются и изгибаются. На изогнутый вал, показанный на фото 1, воздействовали сильные перегрузки вследствие напряжения кручения.



Фото 1. Этот вал подвергался сильным перегрузкам вследствие напряжения кручения.

Важное примечание: когда была приложена сила, вызвавшая повреждение?

При проведении диагностики того, какой механизм привел к повреждению, важным моментом, о котором следует помнить, является то, что повреждения вследствие перегрузки обычно вызваны однократным приложением нагрузки, в то время как

усталостные разрушения всегда являются результатом многократного приложения нагрузки в течение множества циклов. Это означает, что если вал вышел из строя в результате перегрузки, сила, вызвавшая выход из строя, была приложена за секунду до выхода вала из строя. И наоборот, если причиной являлась усталость, первоначальная сила могла быть приложена в течение миллионов циклов до того, как произошел окончательный выход из строя.

В некоторых случаях при поломке пластичный вал ведет себя так же, как и хрупкий вал. На фото 2 показан пример такой ситуации – *то есть что произошло, когда двигатель мощностью 150 кВт, 3600 об/мин, внезапно вышел из строя.* Результатом стало огромное напряжение кручения и треснувший вал. Но поскольку материал является пластичным, трещина находится не под углом 45°, как показано на рисунке 1, кроме того, видна очевидная деформация шпоночной канавки. Когда пластичные материалы подвергаются сильным перегрузкам в течение очень короткого периода времени, они склонны вести себя как хрупкие.



Фото 2. Иногда пластичный вал выходит из строя таким же образом, как и хрупкий, как вышел из строя этот вал в двигателе мощностью 150 кВт, 3600 об/мин, который внезапно перестал работать.

К счастью, хрупкие изломы машинных валов крайне редки. Как и в случае со всеми хрупкими изломами, они характеризуются относительно однородной шероховатостью поверхности – *трещина распространяется с постоянной скоростью и очевидны особенности поверхности, называемые «шеvronные следы».* На фото 3 показан хрупкий излом ведущего вала большого редуктора, который уронили. «Шевронные следы» – это мелкие волнообразные неровности на поверхности, направленные влево от шпоночной канавки.

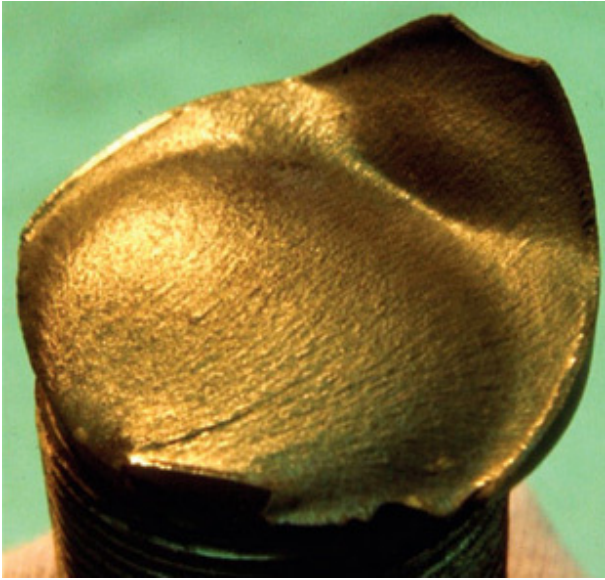


Фото 3. Хрупкий излом, показывающий «шеvronные следы» слева от шпоночной канавки, произошел, когда уронили ведущий вал большого редуктора.

Иногда часть машинного вала упрочняют для уменьшения скорости износа. (**Примечание:** упрочнение поверхности обычно производится исключительно с целью увеличения износостойкости.) На фото 4 показан упрочненный шпоночный участок вала гидронасоса, включая его упрочненную поверхность, кольцо по окружности с текстурой, сильно отличающейся от большей части вала и «шеvronные следы», указывающие на источник повреждения. Исходя из того, как излом распространялся прямо по валу, причина могла быть связана или с перегибом, или с растяжением. Однако его относительно однородная поверхность указывает на то, что излом имеет хрупкий характер – *что также означает, что его причиной стало однократное применение силы*. Более того, поскольку приложить значительное растягивающее усилие к шпонке невозможно, аналитик с уверенностью мог бы сказать, что повреждение было вызвано однократным изгибающим усилием.



Фото 4. На упрочненном шпоночном участке вала гидронасоса показаны доказательства хрупкого излома, вызванного однократным изгибающим усилием.

Усталостные разрушения

Усталость возникает в результате циклических напряжений, при этом силы, вызывающие усталостные разрушения, значительно меньше, чем те, которые привели бы к пластической деформации. Еще больше запутывает ситуацию тот факт, что коррозия уменьшит усталостную прочность материала. Степень уменьшения зависит как от серьезности коррозии, так и от количества циклов напряжения.

Как только трещины становятся видны невооруженным глазом, они всегда распространяются перпендикулярно плоскости максимального напряжения. На рисунке 2 показаны плоскости излома вследствие воздействия четырех типовых усталостных сил. В связи с тем, что свойства участка будут меняться по мере роста трещины, для аналитика важно обратить особое внимание на точку начала повреждения для определения направления сил. Например, несмотря на то, что усталостные силы при кручении часто инициируют повреждение, большая часть развития трещины могла быть при растяжении. Это связано с тем, что вал был ослаблен, а резонансная частота при кручении изменилась.

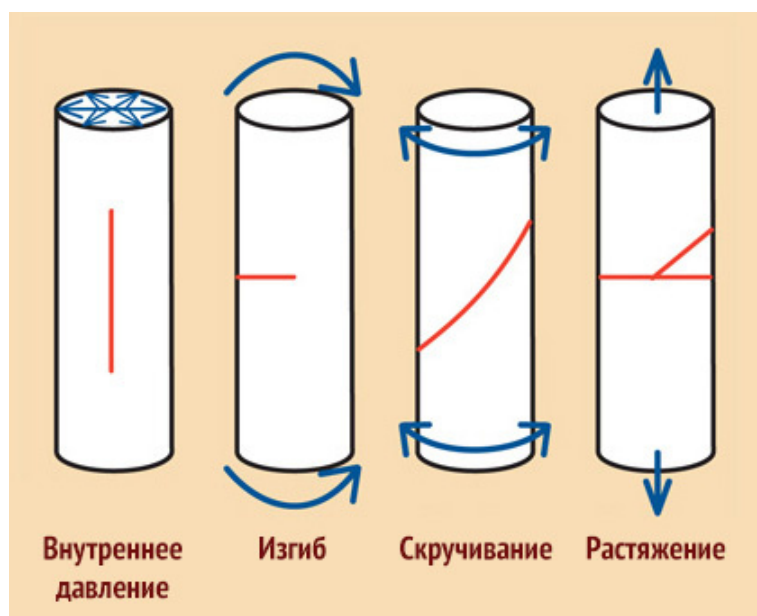


Рисунок 2. Плоскости излома вследствие воздействия четырех типовых усталостных сил. В связи с тем, что свойства участка будут меняться по мере роста трещины, важно обратить особое внимание на точку начала повреждения для определения направления сил.

Состояние или шероховатость поверхности излома — один из наиболее важных моментов, на которые следует обратить внимание при анализе повреждений, в связи с разницей между повреждениями вследствие перегрузки и усталостными разрушениями. При повреждениях вследствие перегрузки — так как трещина развивается с постоянной скоростью — поверхность однородно шероховатая. Однако трещины, вызванные усталостью, распространяются по поверхности излома с постоянно увеличивающейся скоростью. В результате типичная поверхность усталостного разрушения относительно ровная около очага (или очагов) и заканчивается сравнительно шероховатым окончательным разрушением.

Типичная поверхность усталостного разрушения при изгибе показана на рисунке 3. Развитие трещины началось в очаге и медленно продолжилось по усталостной зоне (FZ). Когда она достигла границы мгновенной зоны (IZ) скорость роста трещины резко увеличилась, трещина распространялась по Мгновенной зоне со скоростью приблизительно 8000 футов/с. Во время распространения по Усталостной зоне нагрузка на вал может измениться, что приводит к изменению поверхности, что проявляется в виде следов распространения.

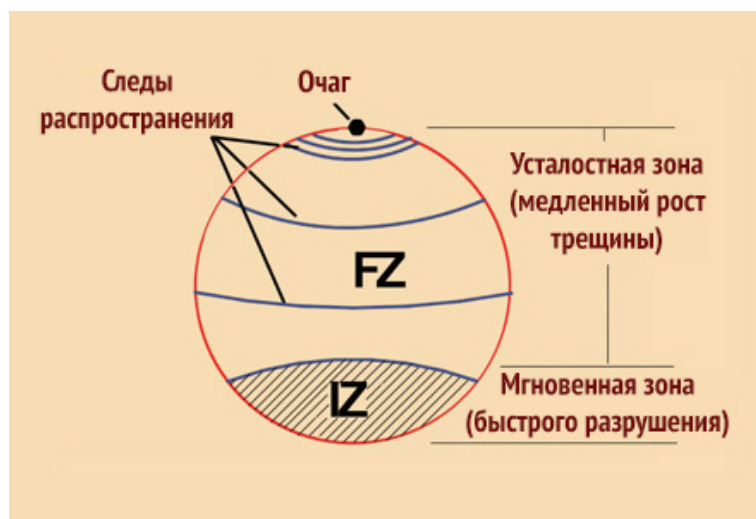


Рисунок 3. Типичная поверхность усталостного разрушения показывает, как начинается развитие трещины в очаге и медленно продолжается по Зоне усталостного разрушения. Когда трещина достигает границы Мгновенной зоны, скорость ее роста значительно увеличивается.

Вращающиеся нагрузки или плоский изгиб

Для того чтобы произошло усталостное разрушение, силы должны были прилагаться много раз. Существуют малоцикловые разрушения, но большая часть промышленных усталостных разрушений, которые мы видели, включает более 1 000 000 циклов нагрузки. Важной особенностью анализа усталостных разрушений является то, что по росту трещин, то есть внешнему виду поверхности, можно сказать о том, как была приложена нагрузка. Если трещина разрастается прямо через вал (как показано на рисунке 3), силой, вызвавшей разрушение, должна быть изгибающая нагрузка, действующая в одной плоскости.

Однако на рисунках 4 и 5 показаны примеры изгиба при вращении. Разница между этими двумя разрушениями в том, что вал на рисунке 4 имеет один очаг, тогда как разрушение на рисунке 5 имеет множество очагов. Глядя на два рисунка, мы видим, что мгновенная зона на рисунке 4 является большей из двух — что указывает на то, что нагрузка на вал, когда он вышел из строя, была больше, чем нагрузка на рисунке 5. Кроме того, анализ показывает, что, несмотря на то, что вал на рисунке 5 был подвержен меньшей нагрузке, он имел гораздо больше очагов разрушения, что указывает на концентрацию высоких напряжений, таких как шаг вала с очень маленьким радиусом. Следы защемления — это

плоскости между смежными очагами трещин, которые растут перпендикулярно распространению трещин.

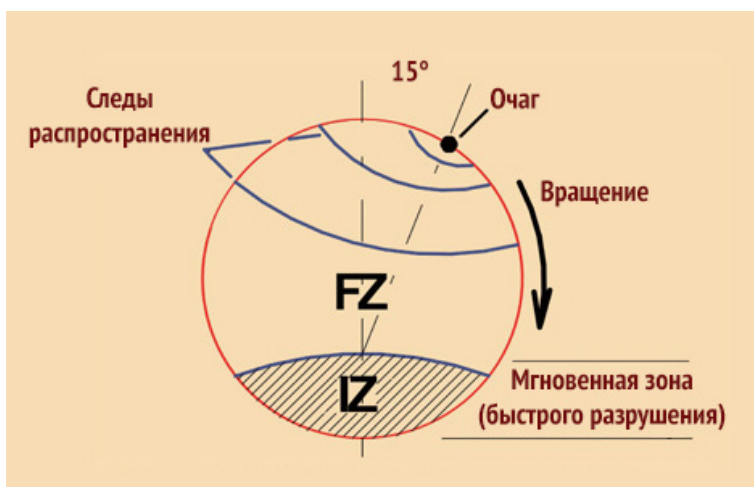


Рисунок 4. В данном примере разрушения при изгибе с вращением разрушение имеет один очаг (и нагрузка на вал, когда он вышел из строя, была больше, чем нагрузка на вал на рисунке 5, когда он вышел из строя).

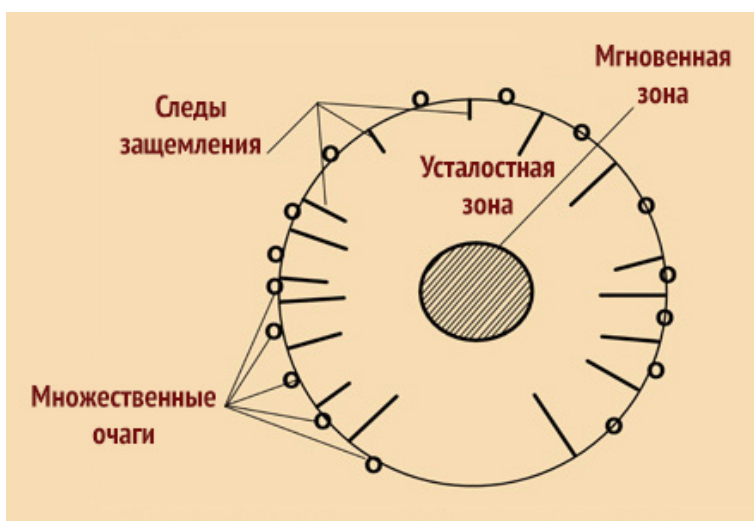


Рисунок 5. Анализ разрушения при изгибе с вращением (с множественными очагами разрушения) показал, что вал находился под меньшей нагрузкой, чем вал на рисунке 4, когда он вышел из строя.

Некоторые примеры диагностики усталости при плоском изгибе и при изгибе с вращением показаны на фото 5 и 6.



Фото 5. Вал этого двигателя мощностью 150 кВт, 1180 об/мин, вышел из строя менее чем за день в результате сильно изношенных шкивов на ременной передаче.



Фото 6. Это медленно растущее разрушение привода элеватора сталепрокатного стана вызвано фреттинг-коррозией, которая значительно уменьшила усталостную прочность вала.

На фото 5 показан вал двигателя мощностью 150 кВт, 1180 об/мин, вышедший из строя менее чем за день. Никакие следы распространения не говорят о том, что усталостная нагрузка была постоянной. Мгновенная зона относительно большая, что указывает на то, что вал находился под большой нагрузкой. Трещинообразование началось в нескольких местах вокруг вала, что указывает на то, что причиной был изгиб с вращением. Множество следов защемления, сосредоточенных в верхней и нижней частях фотографии, заставляют нас подозревать, что вал мог быть не прямым. Однако проверка показала, что основная причина была связана с ременной передачей.

В действительности, шкивы были настолько изношены, что ремни проходили по дну канавок. Эта ситуация предположительно удвоила напряжение изгиба вала.

Приводной вал на фото 6 был на элеваторе сталепрокатного стана. Поверхность наиболее ровная рядом с основанием шпоночной канавки и становится все более шероховатой по мере распространения трещины по валу. Многочисленные следы распространения вокруг крошечной мгновенной зоны и изменение состояния поверхности около 40% пути через вал от мгновенной зоны наводят на мысль, что что-то изменилось во время роста трещины или, что элеватор не использовался в течение длительного периода. Эти признаки свидетельствуют о медленно растущем разрушении — а также о том, что фреттинг-коррозия могла существенно уменьшить усталостную прочность.

Усталостные разрушения при кручении

До появления частотно-регулируемых приводов, усталостные разрушения при кручении случались редко: разработчики оборудования могли предвидеть рабочую частоту вращения и частоту возбуждения и проектировать исходя из этого. Цель частотно-регулируемого привода — сделать возможным работу в широком диапазоне скоростей. К сожалению, это привело к многочисленным сбоям в работе двигателя и приводного вала в связи с факторами усталости при кручении. В то время как наиболее типичные усталостные трещины при кручении начинаются под острым углом (концентрация напряжения) в нижней части шпоночной канавки, при плохом креплении муфт, другим распространенным видом является диагональная трещина вала (такая, как показана на рисунке 2).

На фото 7 показана поврежденная сторона вала двигателя с плохим (слабым) креплением муфт, в результате которого ступица многократно прижимала шпонку к стороне шпоночной канавки, пока не образовалась усталостная трещина. (Нередко встречаются случаи, когда трещина разрослась вокруг вала, оставив только заглушку вала.)



Фото 7. Из-за плохого (слабого) крепления муфт на этом валу двигателя ступица многократно прижимала шпонку к стороне шпоночной канавки, пока не образовалась усталостная трещина.

На фото 8 показаны обе половины усталостного разрушения при кручении вала вентилятора в установке, которую недавно перевели на частотно-регулируемый привод. Угол 45° к центральной оси является верным признаком напряжений при кручении, а изменение шероховатости поверхности на валу указывает на то, что причиной были усталостные силы.



Фото 8. Усталостное разрушение при кручении на этом валу вентилятора произошло вскоре после установки частотно-регулируемого привода.

Усталостные напряжения при кручении часто остаются незамеченными (пока не будет слишком поздно), потому что персонал не понимает то, что видит. Например, оба вала насоса, показанные на фото 9, вышли из строя из-за усталости при кручении, усиленной снижением прочности в результате коррозии. Некоторые могут смотреть на поверхность излома вала справа и думать, что он был вызван изгибом при вращении. Более тщательное изучение множества следов заземления показывает, что они находятся под углом 45° к центральной линии вала – *положительное указание на усталостные напряжения при кручении с многочисленными очагами*. (Обратите внимание, что следы заземления на фото 5 имеют прямые стороны, что свидетельствует о том, что они появились в результате действия изгибающих сил.)



Фото 9. Валы насоса вышли из строя из-за усталости при кручении, усиленной снижением прочности в результате коррозии, а не изгибом при вращении.

Меры предосторожности при интерпретации подсказок

В то время как самая старая часть усталостного разрушения обычно имеет самую гладкую поверхность — *по меньшей мере в 98% случаев* — не менее важно тщательно осмотреть поврежденную часть в зоне очага: по поверхности вала можно определить действующие силы.

Один из самых значительных выводов, который можно сделать из данной статьи, заключается в том, что трещина всегда развивается перпендикулярно плоскости максимального напряжения. Много раз мы видели валы, где иницирующей силой было кручение с короткой угловой трещиной, но большая часть распространения трещин была в изгибе — *заставляя инспекторов думать, что первичной силой была изгибающая сила*. Не дайте себя обмануть.


Невилл Сакс, старший инженер-консультант «**Sachs Salvaterra & Associates**» (подразделение «**Applied Technical Services**»), компании, специализирующейся на неразрушающих испытаниях и технической поддержке для повышения надежности установок и оборудования.

16 июля 2012 года

Это перевод статьи журнала «**Efficient Plant**» (оригинал статьи находится по адресу efficientplantmag.com/2012/07/failure-analysis-of-machine-shafts). Перевод и адаптация — «**Практическая Механика**».



Практическая
Механика

198095, Россия, Санкт-Петербург
ул. Маршала Говорова, д. 52
+7 812 718-4090 тел.
+7 921 555-4090 
info@prmech.ru
prmech.ru