



УДК 62.192:621.43-233

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

**Н.Л. Марьина<sup>1</sup>, Д.Э. Марьин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Кандидат технических наук, доцент, Балаковский институт техники, технологии и управления (филиал) Саратовского государственного технического университета, Балаково, Россия, E-mail: [rdan64@mail.ru](mailto:rdan64@mail.ru)

<sup>2</sup>студент ТМС 61з, Балаковский институт техники, технологии и управления (филиал) Саратовского государственного технического университета, Балаково, Россия

**Аннотация.** При действии знакопеременных напряжений в материале коленчатого вала возникает усталостная трещина, постепенно проникающая вглубь изделия. При переменных деформациях края усталостной трещины сближаются, образуя притертую, гладкую зону излома. По мере развития трещины рабочая площадь сечения ослабляется. Что ведет к разрушению элемента коленчатого вала при эксплуатации. Повышение запаса усталостной прочности объясняется двумя основными причинами: благоприятным влиянием сжимающих начальных технологических остаточных напряжений и улучшением механических свойств поверхностного слоя в результате поверхностного пластического деформирования.

*Ключевые слова:* начальные технологические остаточные напряжения, концентрация напряжений, пластическая деформация, усталостный излом, упрочнение поверхностного слоя.

## **STUDY OF A CRANKSHAFT MATERIAL DESTRUCTION MECHANISM OF FORCED DIESELS**

**N.L. Marin<sup>1</sup>, D.E. Marin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D., Assistant Professor, Balakovski Institute of Technology, Technology and Management (Branch), Saratov State Technical University, Balakovo, Russia, E-mail: [rdan64@mail.ru](mailto:rdan64@mail.ru)

<sup>2</sup>student, Balakovski Institute of Technology, Technology and Management (Branch), Saratov State Technical University, Balakovo, Russia

**Abstract.** During sign-variable tension in a material of a cranked shaft there is the fatigue crack can occur, which is gradually getting deep into a product. Variable deformations produce smooth zone of a break within the material. It leads to destruction of a cranked shaft while working. Increase of a stock of fatigue durability speaks two main reasons: beneficial effect of compressing initial technological residual tension and improvement of mechanical properties of a blanket as a result of superficial plastic deformation.

*Keywords:* initial technological residual tension, concentration of tension, plastic deformation, fatigue break, blanket hardening.





**Введение.** Согласно современным представлениям усталостная прочность твердых тел не только определяется их физико-химической природой, но и зависит от дефекта структуры, которые существуют в реальных телах, например, в коленчатых валах в виде микро- и макротрещин, полостей, включений различного происхождения, дислокаций и т.д. В процессе деформации твердого тела вокруг таких дефектов возникает высокая концентрация напряжений, которая является причиной появления новых дефектов или развития исходных. В теле коленчатого вала начинается процесс локального или полного разрушения.

Примеры разрушений реальных конструкций коленчатых валов по описанному выше механизму показали, что существующих классических методов расчета по упругому и пластическому состояниям недостаточно, что в эти расчеты необходимо вводить новые, существенно отличные от старых, характеристики разрушения. Все это и придало проблеме хрупкого разрушения коленчатых валов первостепенное значение.

Эксплуатационные данные свидетельствуют о том, что 70-85% поломок коленчатых валов происходят по щекам и противовесам от знакопеременных напряжений изгиба [1]. При этом усталостная трещина зарождается, как правило. В галтелях в местах перекрытия коренных и шатунных шеек, где возникает концентрация напряжений, и она проходит различные стадии развития. Так, в результате действия внешних сил уже на ранней стадии работы в опасных участках отдельные кристаллы подвергаются различным пластическим деформациям. Неоднородность этого деформирования обусловлена, главным образом, гистерезисом и необратимыми потерями энергии при циклическом нагружении. Пластические деформации отдельных кристаллитов и их групп вызывают в дальнейшем перераспределение напряжений как от внешних усилий, так и от остаточных напряжений [2]. Металл коленчатых валов состоит из отдельных беспорядочно ориентированных кристаллов неправильной формы зерен. При повторных нагружениях в отдельных, наименее благоприятно ориентированных зернах возникает сдвиг – пластическая деформация. Многократные повторные нагружения в противоположные стороны в неблагоприятно ориентированных зернах по линиям скольжения постепенно развивают усталостные микротрещины – они проходят через все зерно, пересекают границу и распространяются на соседние зерна. Постепенно микротрещины разрастаются. Сечение неослабленного металла все уменьшается, и при каком-то очередном нагружении металл коленчатого вала внезапно разрушается от усталости. Так как в начале объем пластически деформированного металла сравнительно велик, то микротрещин появляется много и они имеют хаотическую ориентацию. В дальнейшем пластические де-



формации сосредотачиваются, главным образом, в вершинах микротрещин, расположенных перпендикулярно действию максимальных нормальных напряжений, что определяет их преимущественное, по сравнению с другими направлениями, развитие.

**Цель работы.** Выявить механизм трещинообразования. Исследовать процесс образования усталостных трещин в высоконагруженных деталях высокофорсированных дизелях. В процессе производства высоконагруженных элементов коленчатых валов возникают начальные технологические остаточные напряжения [3]. Особенность последних состоит в том, что они действуют только в поверхностных слоях деталей глубиной 1-2 мм. Поверхностный слой, как правило, ослаблен из-за структурных и фазовых превращений, изменений по химическому составу, из-за наличия микроконцентраторов напряжений. Ослабление поверхностного слоя может быть связано с наличием начальных технологических остаточных напряжений от механической или термической обработки.

Значительное повышение запаса усталостной прочности при внешних знакопеременных нагрузках получается в результате поверхностного пластического деформирования (ППД) элементов коленчатого вала: щек, противовесов, коренных и шатунных шеек, подшипников скольжения, болтов крепления противовесов.

Повышение запаса усталостной прочности объясняется двумя основными причинами: благоприятным влиянием сжимающих начальных технологических остаточных напряжений (НТОН) и улучшением механических свойств поверхностного слоя в результате ППД.

**Материал и результаты исследований.** Механизм усталостного разрушения материала элемента коленчатого вала заключается в следующем: при действии знакопеременных напряжений в материале возникает усталостная трещина, постепенно проникающая вглубь конструкции. При переменных деформациях края усталостной трещины сближаются, образуя притертую, гладкую зону излома. По мере развития трещины рабочая площадь сечения ослабляется, что ведет к разрушению элемента коленчатого вала при динамическом нагружении – ударе. Зона окончательного излома имеет грубозернистую поверхность. Опыты показывают, что усталостные трещины возникают только при знакопеременных динамических напряжениях [4].

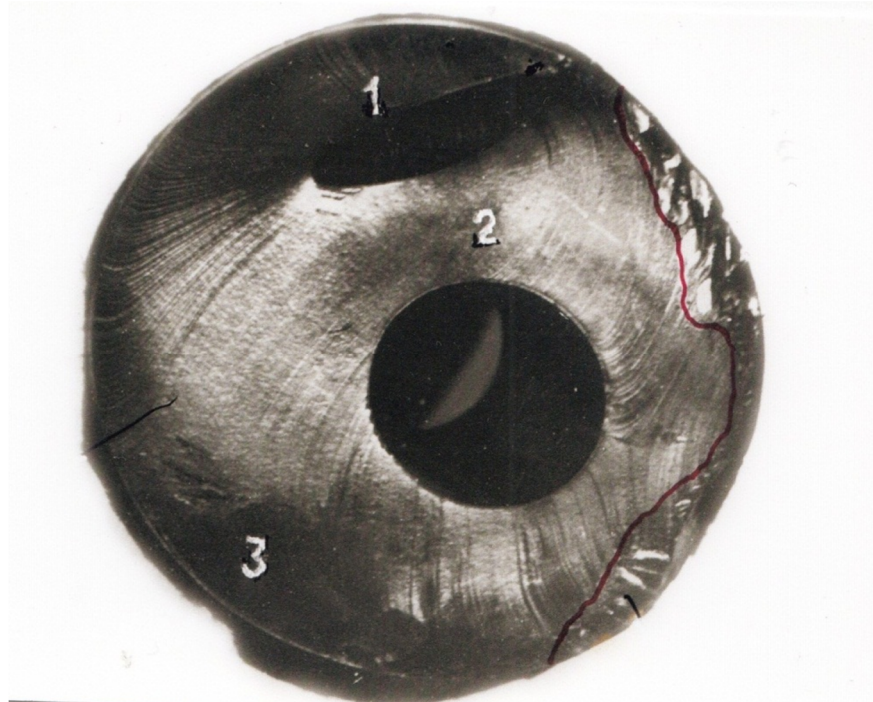


Рисунок 1 – Усталостный излом шатунной шейки коленчатого вала:  
1 – гладкая притертая зона; 2 – промежуточный пористый поясok;  
3 – зона кристаллического излома

Усталостный излом элемента коленчатого вала по внешнему виду отличается от статического излома. Как правило, он имеет три характерные зоны (рис.1): гладкую притертую зону 1 распространения усталостной трещины, узкий промежуточный пористый поясok 2, разделяющий зону 1 от зоны кристаллического излома 3.

Зона предварительного разрушения 2 (промежуточная зона) отчетливо выделяется только при разрушении под воздействием высокочастотной нагрузки. В этом случае нагрузка в течение одного цикла действует микроскопическое время, за которое многие микротрещины, образовавшиеся в промежуточной зоне 2, не успевают объединиться в макротрещину, и после окончательного излома остается тонкий слой металла, густо насыщенный мелкими трещинами и порами, отличающийся по виду от двух других зон. Гладкость зоны 1 распространения усталостной трещины объясняется постепенностью проникновения усталостного разрушения вглубь металла элемента коленчатого вала. На начальной стадии разрушения рост усталостной трещины оказывается очень медленным. С возрастанием напряжений скорость продвижения усталостной трещины растет, в связи с чем увеличивается и шероховатость излома.

На рис. 2 приведена схема усталостного излома щеки коленчатого вала, на которой показаны основные характерные зоны и признаки, поз-





воляющие отличить усталостный излом от других видов излома (хрупкого, вязкого в условиях статического нагружения и др.):

1 – фокус излома и очаг разрушений, от которых начинает развиваться усталостная трещина (начало разрушения), определяются наличием линий усталости. При этом усталостные линии сосредоточенного концентратора напряжений имеют форму дуг концентрических окружностей. Очагом разрушения называют весьма малую зону, прилегающую к фокусу излома и соответствующую начальной макроскопической трещине усталости. Зона излома в области очага разрушения характеризуется наибольшим блеском и наиболее гладкой поверхностью по сравнению с другими участками излома. Усталостные линии на поверхности очага разрушения, как правило, отсутствуют;

2 – участок избирательного ускоренного развития соответствует зоне развивающейся трещины усталости. Эта зона имеет гладкую блестящую поверхность, на которой видны характерные признаки излома. В зоне избирательного развития видны характерные усталостные линии, имеющие волнообразный вид и являющиеся следами фронта продвижения трещины. Появление этих линий связано с некоторым изменением направлением развития трещин, вследствие чего образуются вторичные ступеньки и рубцы. Другой причиной появления усталостных линий является изменение шероховатости поверхности излома при изменении степени перегрузки коленчатого вала при эксплуатации. Форма усталостных линий зависит от формы коленчатого вала и характера его нагружения;

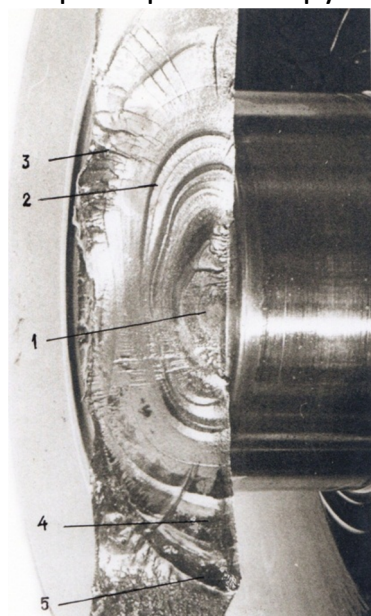


Рисунок 2 - Схема усталостного излома щеки коленчатого вала:

- 1 – фокус излома и очаг разрушения; 2 – вторичные ступеньки и рубцы; 3 – усталостные линии; 4 – зона ускоренного развития излома; 5 – зона долома



3 – участок избирательного развития – зона развивающейся трещины усталости. В этой зоне видны характерные усталостные линии, волнообразно расходящиеся от очага разрушения. Усталостные линии являются следами фронта продвижения трещины. При слиянии нескольких трещин, развивающихся по параллельным плоскостям, возникают первичные ступеньки и рубцы;

4 – зона усиленного развития трещины – переходная зона между участком усталостного развития трещины и зоной долома. Эта зона образуется в течение нескольких циклов, предшествующих окончательному разрушению;

5 – зона долома, последняя стадия усталостного излома, проходящая по аналогии с макрорупким статическим разрушением. Зона долома образуется быстро в течение одного или нескольких циклов нагружений.

Металлографические исследования образцов-свидетелей из материала коленчатых валов показали, что причиной зарождения усталостных трещин является постепенное накопление несовершенств кристаллической решетки в результате многократного повторения пластической деформации металла. Неоднородность реального металла ведет к большому разбросу напряжений не только в различных зернах, но и внутри одного зерна. Причем, усталостная трещина начинает развиваться как по зернам, так и по их границам. Так как в начале объем пластически деформированного материала сравнительно велик, то трещин появляется много, и они имеют хаотическую ориентацию. В дальнейшем пластические деформации сосредотачиваются, главным образом, в вершинах трещин, расположенных перпендикулярно действию нормальных максимальных напряжений, что определяет их преимущественное, по сравнению с другими направлениями, развитие. Появление магистральной трещины приводит к снижению напряжений в этой области, торможению трещин, которые развивались в других направлениях, что обычно характеризуется периодом стабильного роста повреждения.

Поэтому при средних напряжениях, не превышающих предела пропорциональности, возможно появление в отдельных участках зерен значительных напряжений, вызывающих пластическое деформирование не больших объемов металла элемента коленчатого вала.

Первые линии сдвигов, появившиеся в слабых местах или в невыгодно расположенных зернах, постепенно расширяются по мере увеличения числа циклов нагрузки, превращаясь в полосы скольжения, являющиеся зародышами усталостных трещин. Первая стадия «усталости» металла коленчатого вала, заканчивающаяся появлением микротрещин, занимает



5-10% от общего числа циклов, потребного для разрушения образца-свидетеля при заданном режиме знакопеременного нагружения.

Появление усталостных микротрещин не уменьшает статическую прочность образца-свидетеля или элемента коленчатого вала, но подготавливает почву для ускорения процесса образования усталостной трещины и усталостного разрушения. Дальнейшее увеличение числа циклов знакопеременного нагружения коленчатого вала приводит к слиянию микротрещин в трещины, видимые невооруженным глазом. Это вторая, наиболее длительная стадия развития усталостного разрушения занимает от 55 до 80% общего времени работы коленчатого вала под эксплуатационной нагрузкой.

Третья стадия – развитие макроскопической трещины, проникновение ее внутрь образца-свидетеля или элемента коленчатого вала – приводит к резкому уменьшению статической прочности и внезапно хрупкому разрушению образца-свидетеля или элемента коленчатого вала по зоне 4 (рис.2).

Последняя стадия 5 – зона долома непродолжительна и связана с сильным понижением эксплуатационной надежности коленчатого вала. Поэтому обнаружение усталостной трещины должно вести к принятию мер, замедляющих распространение последней или к немедленной замене коленчатого вала.

Таким образом, из приведенного анализа механизма трещинообразования в элементах коленчатых валов следует, что разрушение последних по щекам, противовесам, коренным и шатунным шейкам от знакопеременных напряжений изгиба присущи все закономерности разрушения образцов-свидетелей и, следовательно, приведенные зависимости распределения энергии во время разрушения образцов с достаточной точностью может быть использовано для элементов коленчатых валов. Анализ изломов показывает, что механизм разрушения последних при работе на двигателе и на стенде получается одинаковым и аналогичен картине практических поломок образцов-свидетелей.

В большинстве случаев усталостная трещина начинается в поверхностном слое, главным образом, в галтели шатунной шейки вала и распространяется вглубь детали, о чем свидетельствует характерный блеск поверхности. За этим очагом разрушения следует обширный участок усталостной трещины, соответствующий периоду ее стабильного развития. На этом участке имеют место усталостные линии, соответствующие фронту трещины и вторичные ступени и рубцы, которые появляются тогда. Когда сечение элемента коленчатого вала значительно ослаблено усталостной трещиной. Дальше размещаются участки ускоренного развития трещины и



зона долома, которые занимают 15-20% поверхности и имеют более зернистую структуру, т.е. разрушение при доломе носит макрохрупкий характер. Свое начало трещина берет от локальных ослаблений технологического и эксплуатационного происхождения (надиры и местный наклеп поверхности в местах сочленений элементов коленчатого вала, коррозионные раковины, неровности и риски поверхностей шеек после механической обработки и т.д.) и от мест наибольшей концентрации напряжений (галтели, выкружки, масляные отверстия и т.п.). В подповерхностном слое усталостные трещины возникают реже. Это возможно при наличии упрочненного поверхностного слоя (после дифференцированного гидродробеструйного упрочнения, ультразвуковой обработки и т.д. [5]) или скоплении металлургических дефектов, расположенных близко к поверхности.

**Вывод.** В настоящее время нет единого мнения о причинах и механизме положительного влияния того или иного метода ППД элементов коленчатых валов на их усталостную прочность. Из существующих теорий приводятся три основные.

1. ППД повышает усталостную прочность коленчатого вала потому, что оно создает начальные технологические остаточные напряжения в поверхностном слое его элементов.
2. Поверхностная обработка повышает усталостную прочность коленчатого вала потому, что она увеличивает предел прочности и предел текучести металла его элементов.
3. Поверхностное упрочнение повышает усталостную прочность конструкции потому, что оно улучшает структуру и физико-механические свойства поверхностного слоя элементов коленчатого вала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стативкин Г.П. Усталостные поломки коленчатых валов дизелей и борьба с ними: Тр. ЦНИДИ, вып.60 / Г.П. Стативкин, В.А. Япчеленко. – Л., 1970. – С.37-43.
2. Серенсен С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Справочное пособие / С.В. Серенсен, В.П. Кочаев, Р.М. Шнейдерович. –М: Машиностроение, 1975 – 488 с.
3. Косырев С.П. Исследование остаточных напряжений в высоконагруженных деталях форсированных дизелей / С.П. Косырев, А. В. Разуваев, Л.А. Сорокина, Р.М. Рафигов, Е.А. Комиссаренко// Двигателестроение. – 2003. №3, С.21-24.
4. Марьина Н.Л. Механизм усталостного разрушения коленчатых валов форсированных дизелей – М: Тяжелое машиностроение, №7, 2011. С.22-24.
5. Косырев С.П. Концентрация остаточных напряжений в коленчатом вале форсированного дизеля в условиях поверхностного пластического деформирования / С.П. Косырев, И.О. Кудашева, Н.Л. Марьина// - М: Ремонт, восстановление, модернизация, №5, 2011. С.35-38.