

УДК 621.43:620.193.16

Данилян А.Г., Чимшир В.И.  
НУ «ОМА»

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК И БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ СДВС ОТ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ**

Кавитационное разрушение является одним из наиболее опасных явлений для деталей судового двигателя внутреннего сгорания (СДВС), которые контактируют с охлаждающей водой. Процесс кавитации определяется образованием парогазовых пузырьков в зоне пониженного давления с последующим их схлопыванием в пороговой зоне повышенного давления. В момент схлопывания парогазового пузырька происходит высвобождение термической и кинетической энергии, способной привести в конечном результате к эрозии поверхности детали.

Явление кавитации носит локальный характер и возникает только там, где создаются соответствующие условия, причем, без возможности перемещения в среде возникновения [2]. Сам процесс кавитации, явление многофакторное и до конца не изученное, примером тому, может служить данное исследование, в котором рассматривается причины кавитационного разрушения на омываемой поверхности втулки как факт изменения скорости охлаждающей воды в зарубашечном пространстве двигателя.

Причиной таких разрушений, может быть нарушение сечений профиля протока воды, в следствии полученных дефектов при отливке самого блока двигателя. Такие же разрушения можно наблюдать под воздействием электро-химической реакции внутри блока СДВС, волновой природы деформации цилиндровых втулок, появление гидравлических ударов во внутреннем контуре двигателя, изменения температурного режима выше установленного значения, растворения газа в охлаждающей воде и др[1].

На рис. 1. схематично показан процесс кавитационного разрушения охлаждаемых водой деталей СДВС

Согласно полученных опытных данных по одному из основных направлений процесса кавитации, рассмотрим вибрацию втулок и причины порождающие это явление при эксплуатации судовых дизелей.

Динамика цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя создает основные условия для кавитационного явления. В момент движения поршня, у ВМТ под действием нормальной силы –  $N$  направленной перпендикулярно к зеркалу втулки, создается резкое увеличение скорости в поперечном движении поршня, вследствие чего происходит удар поршня о стенку цилиндра и под воздействием ударного импульса создаются местные упругие деформации.



Рис. 1. Схема процесса кавитационного разрушения охлаждаемых полостей СДВС.

Которые волнообразно распространяются в радиальном и продольном направлениях относительно образующей поверхности втулки[3].

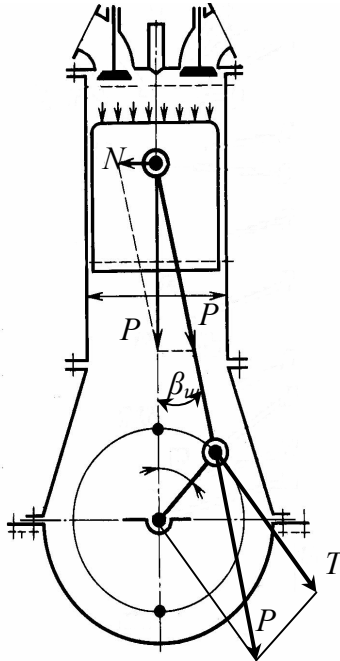


Рис. 2. Динамика сил действующих на ЦПГ и кривошипно - шатунный механизм двигателя.

Во время работы двигателя на поршень действует суммарное усилие:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{г}} - P_{\text{пн}} + P_{\text{ж}} + P_{\text{г}},$$

где  $P_{\text{г}}$  – давление газов, МПа

$P_{\text{пн}}$  – давление газов в подпоршневой полости, МПа

$P_{\text{ж}}$  – условное давление сил инерции поступательно движущихся масс, МПа

$P_{\text{г}}$  – условное давление веса движущихся масс, МПа.

Сама нормальная сила будет равна:

$$N = P_{\Sigma} * \operatorname{tg} \beta_{ш},$$

где  $\beta_{ш}$  - угол между осью цилиндра и осью шатуна[1].

В результате натуральных наблюдений констатировался факт увеличения нормальной силы  $N$  при нарушении центровки ЦПГ на четырехтактных СДВС. Поршень при движении к верхней мертвой точке (ВМТ) приобретал дополнительное усилие ударного импульса за счет деформации шатуна, или нарушения соосности посадки верхнего бурта цилиндровой втулки, и как следствие это приводило к увеличенной кавитации стенки втулки в районе приложенного усилия ударной нагрузки. Как показали дальнейшие исследования, это явление становилось фактом некачественного ремонта, либо нарушения технической эксплуатации СДВС.

Теоретические исследования природы кавитационных разрушений показали, что под воздействием ударного импульса волнообразная упругая деформация втулки приводит к акустическому волнообразному эффекту, который воздействует на пограничный слой омываемой водой поверхности втулки, попеременно производит его растяжение и сжатие. Сам волновой процесс растяжения и сжатия ведет к образованию кавитационных пузырьков, которые циклично под воздействием сил растяжения вытягиваются, а под воздействием сил сжатия схлопываются. В момент схлопывания и концентрации пузырьков в имеющихся пустотах на поверхности втулок, происходит гидродинамический эффект микропотоков воды, которые с большой скоростью ударяются о стенки втулок, тем самым разрушая их поверхность, постоянно бомбардируя их скоростными микропотоками воды. Давление в микрообъеме бомбардируемого микропотока достигает 1000–1500 МПа, а предел текучести высококачественного серого чугуна 200–400 МПа. Это приводит на первой стадии разрушения поверхности втулки к наклепу, а затем развивает эрозию поверхности, и как правило, в сочетании с коррозией и другими вредными воздействиями способствуют скоротечному разрушению поверхности цилиндровой втулки.

Кавитационные разрушения концентрируются на отдельных участках поверхности втулки и занимают определенное положение относительно направления потока охлаждающей воды, вращения коленвала двигателя, и как говорилось выше, наибольшему

разрушению подвергаются участки максимальной ударной нагрузки на стенку втулки по вектору нормальной силы  $N$ .

Из практики известно, что поверхности втулок имеют больший кавитационный износ со стороны входа охлаждающей воды, чем поверхности со стороны выхода [4]. Блоки охлаждаемые с давлением внутреннего контура до 0,2 МПа имеют повышенный кавитационный износ, при повышении давления до 0,3 – 0,35 МПа данный износ снижается.

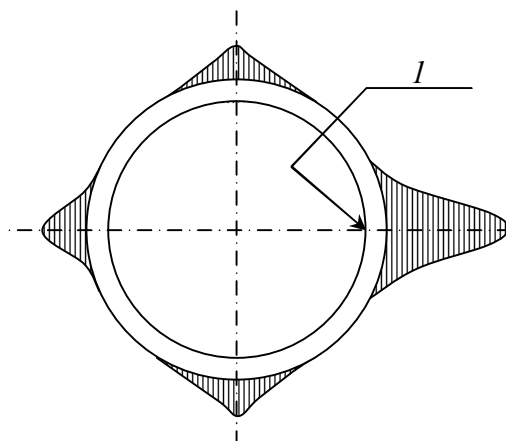


Рис. 3. Схема интенсивности кавитационного разрушения втулки.

1 – поверхность втулки испытывающая максимальную ударную нагрузку.

Неслучайно интенсивность кавитационного разрушения чаще всего наиболее активно проявляется на поверхности цилиндрических втулок высокооборотных и среднеоборотных СДВС вследствие ударной нагрузки, приводящей к колебательному процессу описанному выше. Процесс колебаний втулок, характеризуется колебательным ускорением –  $W$  м/сек<sup>2</sup>,

$$W = A(2\pi f)^2,$$

где  $A$  – амплитуда колебаний, м;

$f$  – частота свободных колебаний, Гц.

Колебания поршня происходит на величину зазора между поршнем и зеркалом втулки в горизонтальной плоскости.

По заключению ряда научных НИИ определен порог величины ускорения, он находится в диапазоне 18 – 20g. Выше этих значений кавитационное разрушение втулок приведет к их замене до установленной нормы наработки заводом изготовителем.

На сегодняшний день, рядом ведущих дизелестроительных компаний, проведены мероприятия по защите цилиндрических втулок и блоков цилиндров от кавитационных разрушений с применением технологий по демпфированию цилиндрических втулок, снижению аэрации охлаждающей воды за счет переоборудования расширительной цистерны внутреннего контура охлаждающей воды двигателя. Схема защиты внутреннего контура оборудуется водным затвором, что предотвращает контакт внутреннего контура охлаждающей воды с атмосферой.

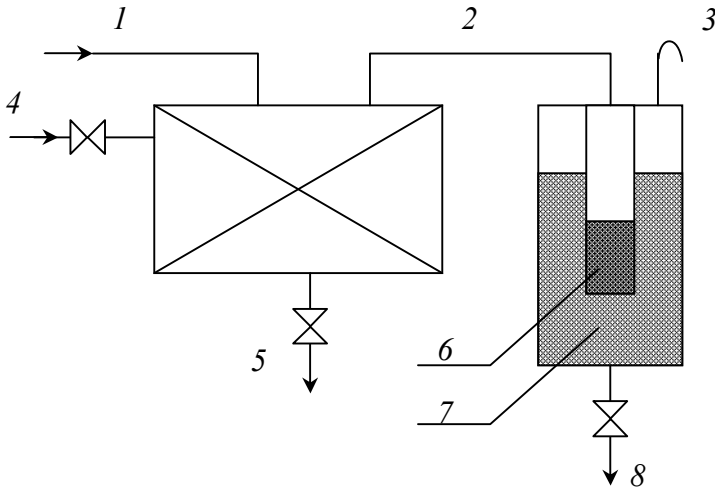


Рис. 4. Схема защиты внутреннего контура охлаждения СДВС от контакта с атмосферой.

1 – перелив от двигателя; 2 – соединительный трубопровод; 3 – воздушная труба; 4 – пополнение; 5 – к насосу; 6 – внутренний цилиндр; 7 – наружный цилиндр; 8 – слив.

Данная схема значительно уменьшает коррозионное разъедание цилиндров и блока двигателя, коррозия и кавитация переходят в единый процесс разрушения поверхности насыщенной парами и кислородом. Коррозионно-кавитационные процессы становятся

наиболее активными в верхних посадочных поясах блоков и цилиндров двигателя благодаря скопившимся парам и газам, создающим застойные зоны, в которых снижается объемная прочность воды, что влечет за собой коррозионно–эрозийные разрушения втулок и блоков цилиндров.

Как и любое тело, вода характеризуется определенными механическими свойствами. Одно из важнейших этих свойств является кавитационная или объемная прочность, которая зависит от сплошности жидкости, а та в свою очередь зависит от отрицательного давления, при котором наступает разрыв жидкости. Такой разрыв называют порогом кавитации. Доказано, что значение порога кавитации зависит от количества растворенного воздуха в жидкости. Исходя из этих наблюдений, были разработаны мероприятия по увеличению гидростатического давления над зеркалом воды, которое воздействуя на газовые пузырьки, сжимает их, уменьшая радиусы пузырьков до полного предела сжатия, что препятствует их разрыву. Дальнейшее сжатие выше предела деформации пузырька существенно не изменяет его радиус, и мало эффективно для смещения порога кавитации [2,4-6].

Проведенные эксперименты на ряде СДВС показали, что увеличение давления в контуре охлаждения двигателя до 0,4 Мпа резко повышает кавитационный порог. До этого применение антикавитационных присадок для охлаждающего внутреннего контура двигателя оказались малоэффективными. Постоянно добавляя воду во внутренний контур, мы снижаем концентрацию присадки, которая, в ряде случаев, не совместима с присадками по снижению жесткости воды и кислородосодержанию. Стоимость антикавитационной присадки достаточно высокая, что делает ее не всегда доступной. Самыми действенными мерами защиты цилиндровых втулок и блоков двигателя от эрозийного разрушения вследствие кавитации, могут быть защитные наделки и качественные покрытия на базе нанотехнологий.

Авторами данной статьи проводились наблюдения и практические работы в течение ряда лет на Измаильском судоремонтного завода. Анализ проводился на ремонтируемых судах типа «Кишинев», буксирах – толкачах тип «Рига», «Иваново», сухогрузах тип «Эльва» и др. Кавитационные разрушения активно проявлялись на протяжении всего срока эксплуатации двигателей.

На вновь построенных судах с наработкой двигателей до 10 тыс. часов серии «Иваново», кавитационные разрушения наблюдались на поверхности цилиндрических втулок в районе ВМТ на хорде  $110^{\circ}$  -  $120^{\circ}$ , высотой 130 – 140 мм, глубина язвин доходила до 1,5мм. Кавитационные разрушения носили эрозионный характер с корродирующими включениями (рис.5.).

Регистром по надзору за судами было выставлено требование о замене цилиндрических втулок с кавитационными разрушениями. Впоследствии ст. мастером мехцеха завода Даниляном А.Г. и ст. технологом техотдела Кашпаровым А.А., была разработана и предложена новая технология по изготовлению защитной наделки из стали 40ХН с креплением ее в местах эрозионного разрушения цилиндрических втулок.



Рис. 5. Кавитационное разрушение цилиндрических втулок судового двигателя.

Инспекция Регистра после согласования технологии в ЦНИИМФ установила промежуточный контроль, за поведением кавитационного разрушения цилиндрических втулок и регламентировала осмотр их с подъемом через 2500 часов и 5000 часов работы двигателя после установки защитных наделок. Это предложение с высокой степенью антикавитационной защиты совмещалось с мероприятиями по созданию повышенного давления во внутреннем контуре охлаждения двигателя до 0,35 МПа морских



судов, не более 0,25 МПа речных судов в виду невозможности установки расширительной цистерны на более высокий уровень во избежание выдавливания охлаждающей воды из внутреннего контура двигателя. В результате проведенной работы дальнейшее кавитационное разрушение цилиндрических втулок прекратилось, как на поверхности антикавитационной наделки, так и под ней.

Предложенная и апробированная технология получила широкое применение на Измаильском СРМЗ Рыбной промышленности на судах типа: «Пролив», «Форес», БМРТ, СРТ, а также нашла свое отражение в технической экспресс информации Минморфлота [7].

В настоящее время имеются технические возможности по созданию новой технологии защиты цилиндрических втулок и блоков СДВС. В этой связи при подготовке научной статьи были проанализированы современные защитные компоненты, созданные на базе последних научных разработок зарубежных авторов с использованием нанотехнологий [8].

В связи с вышесказанным, авторами предлагается новая технология ремонта цилиндрических втулок и блоков двигателей от кавитационного разрушения на основе Полимерметалла – ММ – metal SS – steelceramic. Данный Полимерметалл, является материалом широкого диапазона применения для ремонта и технологического обслуживания всех металлов и сплавов. Материал имеет полное отсутствие контактной и электрохимической коррозии. По своим качествам, способен противодействовать с максимальной степенью защиты кавитационному разрушению, противостоит активным химическим средам.

В соответствии с проведенными исследованиями немецкой компанией MetalExistenceCompany, данный материал обладает следующими техническими характеристиками [8]:

- прочность на сжатие (DIN ISO 604) 200 МПа;
- прочность на растяжение 83 МПа;
- температуростойкость от  $-150^{\circ}\text{C}$  до  $+280^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, в соответствии с предлагаемой технологией ремонта цилиндрических втулок, алгоритм работ производится следующим образом.

На первом этапе, тщательно зачищаются от коррозионного налета, грязи и пыли участки кавитационного разрушения.

На втором этапе, создается повышенная шероховатость поверхности – 75мкм контактным ручным инструментом.

На четвертом этапе, обрабатываемая поверхность обезжиривается ММ – обезжиривателем “Z”, или “С” . В условиях отсутствия требуемого обезжиривателя можно использовать этилацетат или ацетон. Нельзя применять для обезжиривания спирты, бензин, растворители красок.

На пятом этапе, выполняется ручное нанесение защитного состава ММ – SS (шпателем) на эрозийные поверхности цилиндрических втулок.

На шестом этапе, производится многослойное нанесение защитного покрытия, с ожиданием отвердевания каждого слоя. В зависимости от характера разрушения поверхности, защитное покрытие может наноситься с применением армирования нержавеющей сеткой. Высота покрытия, в отдельных случаях, может составлять 1–1,5 мм.

Как показано, данная технология легко может быть выполнена машинной командой судна. Для обеспечения качественной обработки поверхности после ее отверждения, используют карборундовый камень, шкурку на полотне с доведением шероховатости поверхности до Ra – 3,5 мкм [5].

Ремонт посадочных буртов блока СДВС выполняется аналогичным способом. В зависимости от степени разрушения поверхности, как было сказано выше, может быть использовано применение армирования нержавеющей сеткой с нанесением защитного покрытия несколькими слоями в 1 – 1,5мм для обеспечения лучшей адгезии каждого слоя.

Расточка под размер нижнего посадочного бурта блока после обработки поверхности защитным покрытием ММ – SS, выполняется борштангой с использованием карборундового камня, или алмазным резцом для сухого резания. Особое внимание нужно уделить установке борштанги с обязательной выверкой базы по верхнему посадочному бурту блока цилиндров и осей посадочного нижнего бурта блока и мотылевых шеек коленвала в строгом соответствии последней  $90^0 \pm 1''$ .

Технические характеристики обработки посадочного бурта борштангой:

- скорость резания  $V_c = 30 - 125$  м/мин;
- глубина резания  $a_p = 0,5 - 1$  мм.;
- подача резания  $f = 0,1 - 0,2$  мм/об.

Выполнение ремонта нижнего посадочного бурта блока двигателя производится специализированными ремонтными подразделениями в портах, судоремонтных заводах, либо на плановом заводском ремонте. Таким образом, незначительные кавитационные, коррозионные и др. разрушения посадочных буртов можно выполнять силами машинной команды.

**Выводы.** Восстановление цилиндрических втулок СДВС, согласно предложенной технологии, позволяет без вывода судна из эксплуатации выполнить эти работы силами машинной команды с значительной экономией денежных средств.

Ранее, эрозийное разрушение нижнего бурта до наружного диаметра, делало блок двигателя не ремонтнопригодным и он подлежал замене. Данная технология позволяет решить эту техническую задачу. Качество покрытия ММ – SS не уступает защите от кавитации, контактной и электрохимической коррозии лучшим высоколегированным сталям и чугунам.

Впервые при описании процесса кавитации цилиндрических втулок было раскрыто явление, дополнительно увеличивающее нормальную силу  $N$ -давление поршня на зеркало втулки и ускорение поршня в горизонтальной плоскости за счет ухудшенной центровки ЦПГ.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение возможности использования предложенной технологии для ремонта верхнего посадочного бурта блока двигателя под цилиндрическую втулку, что является приоритетным направлением в судоремонте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошелев И.Ф. Справочник судового механика по теплотехнике [Текст]/И.Ф. Кошелев, А.П. Пимощенко // Ленинград. «Судоостроение» 1987 – 480с.
2. Кочетков Е.А. Кавитационные разрушения наружных поверхностей цилиндрических втулок судовых двигателей внутреннего сгорания [Текст]/ Е.А. Кочетков., А.С. Курылев// Сборник научных трудов. Морская техника и технологии/ Астрах. Гос. Техн. Ун-т. Астрахань: Изд-во АГТУ 2000. №1 – С. 86-91
3. Боровой И.В. Влияние кавитации цилиндрической втулки судовых ДВС на безопасность их эксплуатации [Текст]/ И.В. Боровой // Сборник научных трудов. Морская техника и технологии/ Астрах. Гос. Техн. Ун-т. Астрахань: Изд-во АГТУ 2000. №1 – С. 95-98