

УДК 621.181.2

А.Г. Данилян, В.И. Чимшир

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

Проведенные длительные исследования на Измаильском судоремонтном заводе Украинского Дунайского пароходства одним из авторов статьи позволили открыть новое, до того времени неизвестное явление, усиливающее кавитацию поверхности цилиндрических втулок и блоков судовых двигателей внутреннего сгорания. Это явление было обнаружено на цилиндрических втулках двигателей с нарушенной центровкой (привалкой) цилиндропоршневой группы ЦПГ двигателей, где нормальная сила N сопряжения поршень-втулка в связи с этим явлением значительно увеличивалась. При увеличении нормальной силы N на поверхности втулки наблюдались волновые явления её стенок, что и приводило к интенсивному появлению кавитационных пузырьков, при схлопывании которых высвобождалась гидродинамическая и тепловая энергия, в результате чего на поверхности втулок в районе максимального усилия силы N появлялись глубокие кавитационные язвы.

Продолжая исследование, авторами статьи были найдены новые причины появления эффекта кавитации втулок и блоков судовых двигателей морских и речных судов во внутреннем контуре охлаждения из-за увеличенной скорости циркуляции воды в блоке двигателя. Было найдено действенное комплексное предложение по устранению этого опасного явления, разрушающего детали остова двигателя, которое нашло свое широкое применение на судах торгового и рыбного флота.

Ключевые слова: кавитация, язвы, наделка, цилиндрическая втулка, блок цилиндров, судовой двигатель, сила.

Проведені тривалі дослідження на Ізмаїльському судноремонтному заводі Українського Дунайського пароплавства одним з авторів статті дозволили відкрити нове, до того часу невідоме явище, що підсилює кавітації поверхні циліндрових втулок і блоків судових двигунів внутрішнього згоряння. Це явище було виявлено на циліндрових втулках двигунів з порушеною центровкою (привалкою) циліндропоршневої групи ЦПГ двигунів, де нормальна сила N сполучення поршень-втулка в зв'язку з цим значно збільшувалася. При збільшенні нормальної сили N на поверхні втулки спостерігалися хвильові явища її стінок, що і призводило до інтенсивної появи кавітаційних бульбашок, при схлопуванні яких вивільнялася гідродинамічна і теплова енергія, в результаті чого на поверхні втулок в районі максимального зусилля сили N з'являлися глибокі кавітаційні язвіни.

© Данилян А.Г., Чимшир В.И., 2017

Продовжуючи дослідження, авторами статті були знайдені нові причини появи ефекту кавітації втулок і блоків судових двигунів морських і річкових суден у внутрішньому контурі охолодження через збільшену швидкість циркуляції води в блоці двигуна. Було знайдено дієву комплексну пропозицію щодо усунення цього небезпечного явища, що руйнує деталі остова двигуна, яке знайшло широке застосування на судах торгового і рибного флоту.

Ключові слова: кавітація, язвіни, надялинки, циліндрова втулка, блок циліндрів, судовий двигун, сила.

The long-term at the Izmail Shipyard of the Ukrainian Danube Shipping Company, one of the authors of the article, made it possible to open a new phenomenon, which until then had not been known, which enhances the cavitation of the surface of the cylinder bushings and blocks of the ship internal combustion engines. This phenomenon was found on cylinder liners of engines with broken centering (clamping) of the cylinder-piston group of the GPG of engines, where the normal force N , the coupling of the piston-bush, in this connection increased significantly. With an increase in the normal force N on the surface of the sleeve, the wave phenomena of its walls were observed, which resulted in the intense appearance of cavitation bubbles, in the collapse of which, hydrodynamic and thermal energy was released. As a result, deep cavitation ulcers appeared on the surface of the sleeves in the region of the maximum force of force N . Continuing the study, the author of the article found new reasons for the appearance of the effect of cavitation of bushings and blocks of ship engines of sea and river vessels in the internal cooling circuit due to the increased speed of water circulation in the engine block. An effective comprehensive proposal was found to eliminate this dangerous phenomenon, which destroys the details of the engine core. Which has found its wide application on the vessels of the commercial and fishing fleet.

Keywords: cavitation, sores, fitting, cylinder hub, block of cylinders, ship engine, power.

Постановка проблеми. 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.

Целью статьи является нахождение самых действенных технологических мер, способных локализовать вредное воздействие кавитации на детали остова судового двигателя. Создание конечных технологий позволило найти и изучить ряд явлений, проделав определенную исследовательскую работу.

Изложение основного материала. 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 рассматриваются 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 вследствие полученных дефектов при отливке самого блока двигателя. Такие же разрушения можно наблюдать под воздействием электрохимической реакции внутри блока СДВС, волновой природы деформации цилиндрических втулок, при появлении гидравлических ударов во внутреннем контуре двигателя, изменении температурного режима выше установленного значения, растворении газа в охлаждающей воде и др. [1].

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

Согласно полученным опытным данным 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 волнообразного характера [3], которые волнообразно распространяются в радиальном и продольном направлениях относительно образующей поверхности.

Во время работы двигателя на поршень действует суммарное усилие

$$P_{\Sigma} = P_2 - P_{mn} + P_j + P_g ,$$

где P_2 – давление газов, МПа;

P_{mn} – давление газов в подпоршневой полости, МПа;

P_j – условное давление сил инерции поступательно движущихся масс, МПа;

P_g – условное давление веса движущихся масс, МПа.



Рис. 1. Схема процесса кавитационного разрушения охлаждаемых полостей СДВС

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.

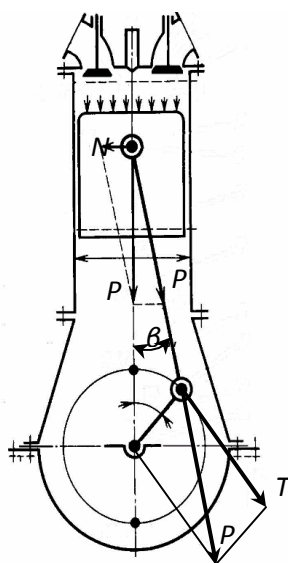


Рис. 2. Динамика сил, действующих на ЦПГ и кривошипно-шатунный механизм двигателя

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 способствует скоротечному разрушению поверхности цилиндрической 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.

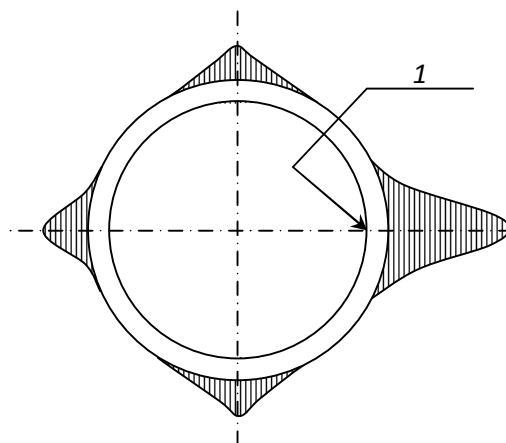


Рис. 3. Схема интенсивности кавитационного разрушения втулки:
1 – поверхность втулки, испытывающая максимальную ударную нагрузку

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/сек²,

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

где A – амплитуда колебаний, м;

f – частота свободных колебаний, Гц.

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

По заключению ряда научных НИИ определен порог величины ускорения, он находится в диапазоне 18-20 g. 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.

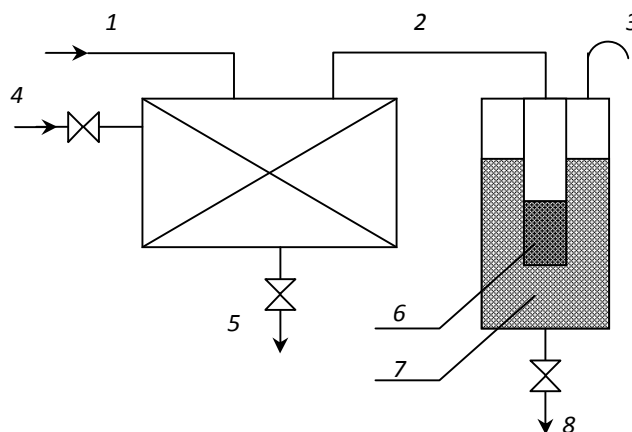


Рис. 4. Схема защиты внутреннего контура охлаждения СДВС от контакта с атмосферой:

- 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. Одним 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 малоэффективно 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 оказалось малоэффективным. Постоянно добавляя воду во внутренний контур, мы снижаем концентрацию присадки, которая, в ряде случаев, несовместима с присадками по снижению жесткости воды и кислородосодержанию. Стоимость антикавитационной присадки достаточно высокая, что делает ее не всегда доступной. Самыми действенными мерами защиты цилиндрических 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 судоремонтном заводе. 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 1100-1200, высотой 130-140 мм, глубина язвин доходила до 1,5 мм. 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 технолога 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.

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.



*Рис. 5. Кавитационное разрушение
цилиндровых втулок судового двигателя*

В результате проведенной работы дальнейшее кавитационное разрушение цилиндрических втулок прекратилось как на поверхности антикавитационной накладки, 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 электро-химической 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 – 1500С до + 2800С.

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

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 $900 \pm 1//$.

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, на 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 с предложенной технологией, позволяет без вывода судна из эксплуатации выполнить эти работы силами машинной команды со значительной экономией денежных средств.

Ранее эрозионное разрушение нижнего бурта блока цилиндров делало блок двигателя неремонтопригодным 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 -давления 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 ЛІТЕРАТУРИ

1. Кошелев И.Ф. Справочник судового механика по теплотехнике [Текст] // И.Ф. Кошелев, А.П. Пимощенко. – Ленинград: Судостроение, 1987. – 480 с.
2. Кочетков Е.А. Кавитационные разрушения наружных поверхностей цилиндрических втулок судовых двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Е.А. Кочетков, А.С. Курьлев // Морская техника и технологии: Сб. научн. трудов Астрах. гос. техн. ун-та. – 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 // Морская техника и технологии: Сб. научн. трудов Астрах. гос. техн. ун-та. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2000. – № 1. – С. 95-98.
4. Юсуфов А.Р. Получение защитных покрытий многофункционального назначения поверхностным легированием отливок в литейной форме [Текст] / А.Р. Юсуфов, И.М. Абачараев // Морская техника и технологии: Сб. научн. трудов Астрах. гос. техн. ун-та. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2010. – № 1. – С. 69-72.
5. Подстрешный Е.В. Кавитационно-эрозионное изнашивание втулок цилиндров судовых СОД [Текст] / Е.В. Подстрешный, В.М. Ходаковский // Судостроение и судоремонт: Сб. научн. трудов. – Вып. 38. – Владивосток: Морск. гос. ун-т, 2012. – С. 7-11.
6. Борщевский Ю.Т. Повышение кавитационной стойкости двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Ю.Т. Борщевский, А.Ф. Мирошниченко. – К.: Высшая школа 1980. – 264 с.
7. Технология по ремонту цилиндрических втулок главных двигателей. – Измаил: ИСРЗ УДП, 1977. – 6 с.
8. Лист технических данных [Электронный ресурс] / MultiMetall. – P.O. Vox Viersen Germany. Режим доступа: [www/ URL: http://multimetall.ru/download/tds/r_dbl_001_ss_steelceramic.pdf](http://multimetall.ru/download/tds/r_dbl_001_ss_steelceramic.pdf).

Стаття надійшла до редакції 20.11.2017

Рецензенти:

кандидат технічних наук, доцент, механік першого розряду, завідувач кафедри СЕУ та систем Дунайського інституту НУ «ОМА»

І.З. Маслов

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Інженерних дисциплін Дунайського інституту НУ «ОМА» **Т.В. Тарасенко**