

УДК 621.5.

DOI: 10.37890/jwt.vi76.400

Повышение работоспособности деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей

Ю.И. Матвеев

М.Ю. Храмов

В.В. Колыванов

С.Ю. Курицын

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Для установленного отремонтированного двигателя на судно, с целью обеспечения его нормальной работы, необходимо провести обкатку. Данная операция заключается в приработке трущихся поверхностей для обеспечения необходимой шероховатости поверхностей, формы поверхностей, увеличение площади контакта сопрягаемых поверхностей. Результатом правильной обкатки считается эффективная работа двигателя, при которой стабильны все параметры двигателя, такие как температура охлаждающей жидкости, температура выхлопных газов, расход топлива, расход масла. За все перечисленные параметры двигателя в большинстве случаев отвечают детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) в особенности поршневые кольца, которые работают в максимально экстремальных условиях. Новые поршневые кольца, с идеальной формой вставленные в поршневую канавку поршня не могут обеспечить плотного прилегания к поверхности цилиндра во время движения, в связи с этим в отдельных местах появляются просветы, нарушающие герметичность камеры сгорания. Устранение данных просветов является одной из главных задач приработки сопрягаемых поверхностей. Основными факторами, влияющими на продолжительность обкатки - это макрогеометрия поршневых колец, профили рабочей поверхности поршневого кольца и цилиндра, шероховатость поверхностей, режимы обкатки, смазка и приработочные покрытия. Анализируя научные исследования в данной области и опираясь на свой опыт, был сформирован алгоритм обкаточных работ, который в последствии опробован на двигателях. Заключительная стадия исследования в данном направлении состояла на анализе положительных результатов опыта и на его основе были предложены формулы для двигателей разной оборотности.

Ключевые слова: поршневые кольца, износ, обкатка, приработка, камера сгорания, цилиндропоршневая группа.

Improving the performance of parts of the cylinder piston group of marine diesel engines

Yuriy I. Matveev

Michael Y. Khramov

Vladimir V. Kolyvanov

Sergey Y. Kuritsyn

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. For the repaired engine installed on the vessel, in order to ensure its normal operation, it is necessary to run-in. This operation consists in the running-in of rubbing surfaces to ensure the necessary surface roughness, surface shape, and an increase in the contact area of the mating surfaces. The result of proper running-in is considered to be the efficient operation of the engine, in which all engine parameters are stable, such as coolant temperature, exhaust gas temperature, fuel consumption, oil consumption. In most cases, the details of the cylinder piston group, especially the piston rings, which operate under the most extreme conditions, are responsible for all the listed engine parameters. New piston rings, with an ideal

shape inserted into the piston groove of the piston, cannot ensure a tight fit to the cylinder surface during movement, in this regard, gaps appear in some places that violate the tightness of the combustion chamber. Elimination of these gaps is one of the main tasks of running-in of the mating surfaces. The main factors affecting the duration of the run-in are the macrogeometry of the piston rings, the profiles of the working surface of the piston ring and cylinder, the roughness of the surfaces, the running-in modes, lubrication and maintenance coatings. Analyzing scientific research in this field and relying on their experience, an algorithm of running-in works was formed, which was subsequently tested on engines. The final stage of the research in this direction consisted of the analysis of the positive results of the experiment and on its basis formulas for engines of different turnovers were proposed.

Keywords: piston rings, wear, running-in, breaking-in, combustion chamber, cylinder piston group.

Введение

XXI век внёс свои коррективы в развитие промышленности. Наступило время цифровых технологий, позволяющее добиться уникальных результатов. На сегодняшний день для изготовления деталей двигателя используют станки с компьютерным управлением, возможность которых позволяет обеспечить самые жёсткие допуски. Это особенно необходимо для сопряжённых деталей. К наиболее ответственным сопряжённым деталям двигателя можно отнести детали цилиндропоршневой группы в особенности поршневые кольца, изготовление которых на сегодняшний день благодаря технологическим возможностям позволяет монтировать в новый двигатель без притирки к поверхности цилиндра за счёт прецизионной обработки на конечной стадии производства. К сожалению, для двигателей, отработавших период времени до ремонта, данные технологии применить невозможно, поскольку детали двигателя в процессе работы подвергаясь механическим и тепловым нагрузкам теряют идеальную форму. Рабочие поверхности долго и нормально работавших деталей обладают признаками, существенно отличающимися от исходных (технологических) и от свойств основного материала, из которого они выполнены. При установке новых поршневых колец, площадь фактического контакта со стенкой цилиндра будет небольшой и будет соответствовать суммарной площади контакта макровыступов шероховатости стенки цилиндра. Во время работы пары поршневые кольца-втулка цилиндра, в месте контакта происходит повышение температуры за счёт сил трения, которые приводят к пластической деформации макровыступов, тем самым меняя поверхность поршневого кольца, адаптируя её к условиям поверхности цилиндрической втулки. Период приработки сопряжённых деталей двигателя принято называть обкаткой, обеспечивающая возможность нормальной работы при разных нагрузках.

Методы

Процесс перехода свойств поверхностей трения от исходных к эксплуатационным называется приработкой. Завершение приработки характеризуется комплексом факторов, проявляющихся после определенного (достаточно длительного) периода работы дизеля на режиме полной эксплуатационной мощности. Исходное состояние геометрической формы сопрягаемых поверхностей изменяется, обеспечивая максимальное прилегание, тем самым увеличивая площадь их фактического контакта, снижаются нормальные и касательные напряжения при взаимодействии этих поверхностей. Исходная шероховатость ликвидируется, и формируется новый равновесный микрорельеф поверхностей, обладающий определенными параметрами, наилучшим образом, соответствующими заданным условиям работы пары трения.

Образующий прочный и износостойкий поверхностный слой характеризуется положительным градиентом механических свойств (увеличением прочности по глубине), особым напряженным состоянием (с преобладанием напряжений сжатия), наличием прочных адгезированных защитных пленок, способностью восстанавливать свои свойства и размеры.

Скорость изнашивания, коэффициент трения, температура рабочих поверхностей стабилизируются на низком уровне.

Формируется прочная смазочная пленка на рабочей поверхности.

Сопрягаемые поверхности приобретают ровный отблеск по всей площади, характеризующий отсутствием повреждений (рисок, микрорадиов, цветов побежалости и т. п.) либо наличием лишь следов старых «заживающих» повреждений.

Процесс приработки можно отнести к одному из самых сложных технологических процессов, который происходит под воздействием постоянно меняющихся факторов, таких как шероховатость и форма поверхности, условие смазки, напряжённое состояние, изменение структуры поверхностного слоя сопрягаемых поверхностей и прочее. Для смягчения влияния данных факторов во время приработки необходимо постоянно нагружая двигатель создать ряд обязательных условий, включающих в себя обеспечение эффективного отвода тепла и смазки сопрягаемых деталей с контролем трущихся поверхностей.

Срок обкатки, как правило, на много меньше периода полной приработки деталей, с целью максимального сохранения ресурса двигателя. Тем не менее за время обкатки должно быть обеспечено хорошее прилегание сопрягаемых поверхностей, характеризующееся большой площадью контакта, обеспечение эффективной смазки, высокий уровень износостойкости рабочей поверхности, чтобы в случае изменения условий работы двигателя (как правило чрезмерная нагрузка) оставшаяся не притёртая поверхность не была повреждена.

К признакам качественной обкатки можно отнести:

1. Полноценное прилегание друг к другу сопряжённых поверхностей, при которой возможна максимальная площадь контакта;
2. Снижение скорости изнашивания;
3. Отсутствие новых повреждений на поверхности трения;
4. Эффективное смазывание рабочей поверхности;
5. Отсутствие на рабочей поверхности следов механической обработки.

Основной процесс приработки осуществляется за счёт силы трения, возникающей при перемещении сопрягаемых деталей. В большинстве случаев сила трения носит разрушительный характер, благодаря которой происходит износ трущихся поверхностей, потеря мощности при чрезмерном её росте, не учтённое повышение температуры рабочей поверхности и прочее. Тем не менее у данной силы есть и положительная сторона. Без её влияния невозможно произвести приработку трущихся поверхностей, а, следовательно, и ввести в эксплуатацию отремонтированные двигатели. Явления, происходящие на рабочих поверхностях во время трения, исследуют учёные многих стран, и на данный момент единая теория трения не сформирована. Хотелось отметить исследования в этой области И. В. Крагельского [2] и его учеников, проводимые в Советском Союзе, поскольку данная теория трения была доведена до практического использования и на её базе были разработаны расчётные методы, позволяющие получить ответы на многие вопросы. Но, к сожалению, имеющиеся исследования не дают нам чёткого понимания для создания общей модели и методики проведения обкаточных работ. Есть вопросы, на которые нет единого мнения для ответа, такие как: какая шероховатость сопрягаемых поверхностей должна быть перед началом притирочных работ, какая продолжительность по времени обкаточных работ, выполнять притирку на одном режиме или режим нагрузки необходимо менять, с какой нагрузки начинать и каков шаг её увеличения и т.д. С

уверенностью можно сказать только то, что обкатка необходима и важна для получения максимальной отдачи от двигателя в виде заявленной мощности от производителя с минимальными затратами (расход топлива и масла).

Высокая температура и давление, работа в условиях граничной смазки, а иногда и при её отсутствии, малые скорости скольжения и агрессивная среда делают поршневые кольца одними из самых нагруженных деталей цилиндропоршневой группы и всего двигателя. Перечисленные условия, сопровождающие работу поршневых колец, усугубляются при их установке вновь или после проведённого ремонта, поскольку отсутствует плотное прилегание рабочей поверхности поршневого кольца к стенке цилиндра. Отсутствие нужной формы и шероховатости при притирке приводят к повышенным температурам, вследствие чего в месте контакта может произойти схватывание поверхностей. Данное явление возникает, когда на поверхности кольца не сформирован износостойкий поверхностный слой, и может привести к тяжёлым повреждениям, которые иногда можно исправить только путём замены на новые детали.

Помимо схватывания в процессе работы ЦПГ нередко случаются и задиры [1]. Природу возникновения данных явлений, заставляет многих учёных проводить исследования в данной области. Все авторы сходятся на том, что непременным условием схватывания является металлический контакт участков поверхностей, лишенных оксидных других адгезированных защитных плёнок, а высокие температуры и пластические деформации поверхностного слоя деталей способствуют этому. При схватывании резко усиливается изнашивание, на стальных и чугунных поверхностях трения появляются так называемые «белые слои», обладающие высокой твердостью и хрупкостью. Легко выкрашиваясь и попадая в зону трения, «белые слои» вызывают усиленное абразивное изнашивание, которое в свою очередь создает условия для схватывания и образования новых «белых слоев». Такой процесс часто носит лавинообразный характер и приводит к полному выходу из строя деталей трения. Исследования «белых слоев» [3,4,5,6] показали, что их структура зависит от условий образования, а толщина может достигать 60 мкм. Многие исследователи [4,7,8] считают, что форсированный режим обкатки может служить причиной появления «белых слоев». Большое влияние на приработку оказывают такие факторы, как макро и микрогеометрия поверхностей трения, поскольку от них в значительной степени зависит площадь фактического контакта и характер деформации поверхностного слоя, а также количество, качество и распределение смазочного материала на поверхности.

Макрогеометрия поршневых колец. Новые поршневые кольца не могут плотно прилегать всей своей рабочей поверхностью к стенке цилиндра. Из-за неодинаковой жесткости в разных поперечных сечениях поршневое кольцо, вставленное в круглый цилиндр, изгибается неравномерно, и в отдельных местах между кольцом и стенкой цилиндра появляются просветы. Наличие просветов неизбежно в новой паре кольцо — втулка. Значения просветов H , мм, регламентированы РТМ 31.5028–77 в зависимости от диаметра цилиндра D и определяется выражением $H = 0,01 + 0,00008D$.

Через эти просветы могут прорываться горячие газы из камеры сгорания, перегревая поверхности трения и сдувая с них масляную пленку. Специалисты фирмы «Зульцер» установили, что прорывы газов достигают значительных величин при ширине просвета свыше 20 мкм и практически исчезают при ширине просвета менее 10 мкм. Из вышеизложенного следует, что без приработочного износа обойтись нельзя, а значение необходимого приработочного износа во многом зависит от диаметра цилиндра, точности изготовления и монтажа деталей ЦПГ.

Профили поршневых колец. Самым распространённым профилем поршневого кольца является прямоугольник. В процессе притирки к поверхности цилиндра, кольца приобретают бочкообразный профиль, положительно влияющий на распределение смазки по поверхности цилиндра. Это особенно необходимо для верхнего поршневого кольца, которое работает в условиях граничной смазки, что особенно критично при

малых скоростях поршня в районе верхней мёртвой точки. Бочкообразный профиль – это результат конечной стадии притирки. Многие производители колец стараются придать бочкообразную форму новому кольцу, для сокращения сроков приработки, но это не всегда рационально, поскольку, сглаживая кромки во время притирки, поршневое кольцо приобретает форму цилиндра, тем самым обеспечивая герметичность камеры сгорания. К сожалению, при большом износе поверхности цилиндра или его деформации, герметичность камеры сгорания, за счёт притирки колец не всегда получается достигнуть. Например, согласно статистике, для двигателя ДКРН 74/160, компенсацию износа цилиндровой втулки притиркой поршневых колец, можно обеспечить не более 3,5-4мм на диаметр, при большей компенсации происходит разрушение поршневых колец.

Шероховатость сопрягаемых поверхностей. Шероховатость поверхности характеризуется двумя формами – микровыступами при помощи которых происходит контакт с сопрягаемым телом и впадинами, которые при работе могут копить смазку и соответственно смазывают поверхность трения в случае необходимости. В процессе работы на рабочей поверхности появляются царапины, которые могут служить в качестве проводника масла, тем самым играя положительную роль в процессе смазывания. При возникновении металлического контакта между трущимися поверхностями, выделяющееся тепло отводится двумя способами. Первый способ зависит от свойств материала деталей, а точнее от теплопроводности, при котором тепло распространяется в глубь тела с последующей передачей менее нагретому телу. При втором способе передача тепла осуществляется при помощи излучения в окружающую среду. При излучении шероховатость играет важную роль, поскольку данный способ передачи тепла напрямую зависит от площади и излучательной способности поверхности. Чем грубее шероховатость, тем больше коэффициент черноты излучения, т. е. больше тепла излучает поверхность трения в окружающую среду.

Многочисленными исследованиями определено, что шероховатость поверхностей трения, получающаяся в результате приработки, не зависит от исходной технологической шероховатости. Какой бы ни была исходная шероховатость (грубой или очень гладкой), после приработки устанавливается вполне определенный микрорельеф, зависящий только от условий трения, который называют равновесным. Пока сохраняются условия трения, не утрачивается и соответствующий микрорельеф поверхностей. Если поверхности слишком грубые, их взаимодействие сопровождается значительными пластическими деформациями микронеровностей и может привести к схватыванию и задирам. Однако практика показывает, что чрезмерно гладкие поверхности также не могут воспринимать рабочие нагрузки без повреждений. Для объяснения этого явления И. В. Крагельским и его учениками предложена гипотеза «пленочного голодания» [2], согласно которой чем глаже поверхности, а, следовательно, больше размеры пятен фактического контакта, тем медленнее образуются на них защитные пленки и тем быстрее они изнашиваются.

Смазка. Функции смазочного материала сложны и разнообразны. Масло разделяет поверхности трения, охлаждает их, очищает от продуктов изнашивания, защищает от окружающей среды, участвует в образовании защитных пленок на поверхности трения и т. д.

Первые исследования, посвященные влиянию свойств масла на приработку, касались подбора вязкости масла [9,10]. Исследования обкатки автотракторных дизелей, выполненные Н.П.Воиновым, показали, что для приработки рационально использовать маловязкие масла. Такие масла легко распределяются по поверхностям трения, обладают хорошей охлаждающей способностью, что важно для обкатки. Можно, однако, привести и противоположные рекомендации, изложенные в работах [11]. Есть мнение о наиболее существенном влиянии вязкости масла лишь при гидродинамической смазке. Для граничной смазки, как указывает Л. А. Старосельский,

вязкость масла вообще не играет никакой роли. При этом на прочность адгезированной пленки масла влияют лишь свойства поверхностей и самого масла, характеризующиеся его маслянистостью. Однако опыты с экспериментальным высоковязким маслом М20-Е60 с вязкостью около 20 мм²/с (20 сСт) при 100 °С и композицией присадок, аналогичной маслу М16-Е60, которые были проведены на дизеле 9ДКРН 80/160, показали, что повышение вязкости масла увеличивает надежность работы ЦПГ [12]. При сравнении дизелей, работавших на масле М16-Е60 (дизели работали на топливах газотурбинном, ДТ и ДМ с содержанием серы 1–2%) и на масле М20-Е60, у последних износ поршневых колец оказался на 33%, а нагарообразование на поршнях в 1,5 раза меньше. Данные, свидетельствующие о предпочтительности более вязких масел для тяжелых условий трения (а именно такие условия имеют место во время приработки), можно встретить и у других авторов. Для крупных дизелей, где просветы между кольцами и стенкой цилиндра могут достигать значительной ширины (до 0,1 мм) даже на качественно изготовленных ЦПГ, масла с повышенной вязкостью имеют еще и другое важное преимущество – обеспечивают лучшее уплотнение колец по сравнению с маловязкими маслами. Поэтому авторы являются сторонниками применения вязких масел при обкатке. Очень важным фактором, влияющим на прочность масляной пленки, является температура поверхностей трения [13,14]. Для каждого сочетания материала поверхности и сорта масла существует своя критическая температура, при достижении которой масляная пленка теряет свою несущую способность. Поверхностная температура детали складывается из следующих температур: объемной, зависящей от условий работы детали в дизеле, и трения (так называемой температурной вспышки) в пятнах фактического контакта поверхностей трения, зависящей от условий трения. Отсюда ясно, что обеспечить условия работоспособности масла, т. е. такую среду, при которой поверхностная температура была бы ниже критической при данных условиях трения, возможно тремя путями: уменьшить объемную температуру тела, уменьшить температуру трения, использовать масло, имеющее более высокую критическую температуру. Первый путь предусматривает создание эффективного охлаждения деталей, второй – применение пониженных нагрузок, особенно на первых режимах обкатки, когда условия трения особенно тяжелы, третий – тщательный выбор сорта смазочного масла.

Прирабочные покрытия. Большую роль в облегчении приработки могут играть покрытия из мягкого металла. Быстро изнашиваясь в местах контакта кольца и втулки, медные покрытия поршневых колец позволяют быстро ликвидировать просветы и прорывы газов. Кроме того, при изнашивании частицы меди переносятся на поверхность втулки и служат ей защитным покрытием, предотвращающим задир. Для той же цели широко применяют прирабочные пояски на тронках поршней. В работе [3,15] приводятся результаты испытаний медного, оловянного и кадмиевого покрытий чугуновых образцов на износ. Установлено, что изнашивание медного покрытия в начальный период очень интенсивно, но через 15–20 мин практически прекращалось. Повышение нагрузки приводит к новому усиленному изнашиванию покрытия в течение около получаса после чего снова этот процесс обнаружить нельзя. Покрытие кадмием по эффективности аналогично медному, но интенсивность его изнашивания выше. Олово удаляется в масло с одинаковой скоростью во время приработки и после нее. Отмечается сокращение продолжительности приработки в 3 раза. По мнению К. Энглиша, кольца с мягким медным гальваническим покрытием толщиной 0,2–0,3 мм могут вообще не подвергаться обкатке, а сразу работать при полной нагрузке. Особенно хорошо по сообщению К. Энглиша, такие кольца зарекомендовали себя в крупных дизелях, работающих на тяжелых топливах. Он считает, что при использовании колец с медным покрытием отпадает необходимость в применении корригированных колец.

В целях снижения износа доступны различные основные инструменты для снижения трибологических напряжений. Наиболее популярными являются покрытия

из хрома и молибденовые покрытия. Поскольку износостойкость данных материалов намного выше, чем у чугунных, то время приработки соответственно увеличивается приблизительно в 3-5 раз [8]. А на дизелях большой мощности при установке всего комплекта новых поршневых колец с хромовым покрытием, приработка практически сводится к нулю. Поскольку при установке новых колец образуются зазоры между радиальной стенкой поршневого кольца и стенкой цилиндра, что приводит к пропуску отработавших газов. Для выхода из данной ситуации хромированное поршневое кольцо устанавливают только в верхнюю канавку, в оставшиеся канавки устанавливают чугунные кольца, приработка которых осуществляется довольно быстро. Соответственно во время приработки первую функцию по герметичности камеры сгорания берёт на себя второе кольцо. Для облегчения приработки верхнего кольца необходимо ему обеспечить такую форму, чтобы просветов практически не было. Это можно сделать, например, притиркой кольца по цилиндру либо нанесением слоя мягкой меди.

В современном двигателестроении наблюдается тенденция к уменьшению периода обкатки. Это связано не только с появлением новых технологий и возможностей в машиностроении, но также с развитием химической промышленности, благодаря которой появляются высококачественные сорта масел, позволяющие снизить трибологическую нагрузку на детали цилиндропоршневой группы. Также хочется отметить получение богатого опыта, позволяющего на интуитивном уровне производить качественную обкатку, выбирая для конкретного двигателя определённый алгоритм работ, включающий в себя следующие факторы:

1. Количество обкаточных режимов;
2. Продолжительность всего периода обкаточных работ и каждого режима в отдельности;
3. Величина начальной нагрузки и ступени постепенного возрастания нагрузки двигателя;
4. Частота вращения двигателя;
5. Сорт топлива и смазочного масла.

Не учитывая тот или иной фактор может привести к повреждениям не притёртых деталей и соответственно к более дорогому ремонту двигателя.

Количество обкаточных режимов. Фирмы изготовители по-разному подходят к предъявлению требований по количеству обкаточных режимов. В большинстве случаев у производителей нет чёткого представления и чётких указаний по проведению обкатки. Большинство фирм (например, фирма «Фиат») склоняются к тому, что не нужно никаких сменных режимов, достаточно определённое время поработать на нагрузке 60-80% от номинальной мощности. Этого достаточно для притирки всех сопрягаемых деталей. Другие фирмы напротив рекомендуют повышать нагрузку этапами, при этом контролируя все показатели двигателя. Хочется отметить, что при выборе способа обкатки, все-таки следует руководствоваться рекомендациями организаций, эксплуатирующими двигатели, поскольку их эксплуатационный опыт более приближён к реальности.

Продолжительность обкатки. При замене втулки цилиндра число положительных результатов растёт с увеличением продолжительности обкатки. При длительности 100–200 часов (для МОД) подавляющее число обкаток заканчивается благополучно. Из-за малого количества материала (всего 41 случай) не удалось дифференцировать эти данные по типам дизелей. Обкатка после замены только поршневых колец (317 случаев) может быть проведена за более короткий отрезок времени.

Влияние нагрузки. Большинство удовлетворительных результатов обкатки после замены втулки цилиндра и поршневых колец наблюдалось, когда более половины общей продолжительности занимали режимы 70–80% номинального среднего индикаторного давления. После большинства видов ремонта, как показали результаты

анализа собранных материалов, нагрузка первого режима обкатки может составлять около 50% номинального, а в некоторых случаях (мотористка и другие мелкие работы по ЦПГ) – даже 70%.

Влияние ступеней повышения нагрузки. Обкатка после замены втулки цилиндра или поршневых колец протекает лучше, если нагрузку повышают ступенями по 15%. При обкатке после других видов ремонта ЦПГ влияние нагрузки на исход обкатки прослеживается только для дизелей Фиат 909S, где больше положительных результатов получается при повышении нагрузки ступенями по 5% от номинального.

Влияние частоты вращения. По собранным материалам влияние частоты вращения дизеля на качество приработки оценить не удалось. Обкатки изменялась от 50–80 до 100% эксплуатационной, а во втором – от 90 до 100%. Средние значения частот вращения за время обкатки составляли: в первом случае 80–90%, во втором – около 95% эксплуатационной частоты. Однако если учесть работу дизелей по винтовой характеристике (связь между частотой вращения и нагрузкой), а также принять во внимание выводы о влиянии нагрузки, можно предположить, что обкатка при больших частотах вращения должна протекать благоприятнее.

Установлено, что после замены колец обкатку можно начинать с 70% нагрузки, после замены втулки цилиндра – с 50–60%, а после ее абразивной обработки – только с 40–50%. Переход нагрузки с одного режима на другой должен быть с меньшим перепадом для большей нагрузки и в среднем должен составлять около 10% от номинального. При опытных обкатках влияние сорта топлива на их исход не было обнаружено. Если качество цилиндрического масла соответствовало содержанию серы в топливе, обкатка на любых сортах топлива (дизельное, моторное и мазуты) протекала одинаково.

Результаты

Обкатка двигателя: ДВС NVD-32/48–A2U N=730кВт, n=300об/мин, после ремонта ЦПГ, (втулки и кольца) масло 16Г2 ЦС или САЕ-40, топливо ДЛ (дизельное по ГОСТу).

1. Начинаем обкатку на прогревом двигателе – $T_{\text{воды}} = 70^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{масла}} = 40^{\circ}\text{C}$.

2. Назначаем режимы обкатки (1n, 2n, ... 6n) с 50% нагрузки от $N_1 / N_{\text{ном}} = 50\%$, обороты при различных нагрузках определяем по формуле:

$$n = n_{\text{ном}} \times \sqrt[3]{N_{1..6} / N_{\text{ном}}}$$

$$1n(50\%) = 300 \cdot 0,5 = 300 \cdot 0,8 = 240 \text{ об/мин}$$

$$2n(60\%) = 300 \cdot 0,84 = 252 \text{ об/мин.}$$

$$3n(70\%) = 300 \cdot 0,893 = 268 \text{ об/мин}$$

$$4n(80\%) = 300 \cdot 0,933 = 280 \text{ об/мин}$$

$$5n(90\%) = 300 \cdot 0,966 = 290 \text{ об/мин}$$

$$6n(100\%) = 300 \text{ об/мин.}$$

Режим обкатки ступенчатый, время перехода с одного режима на следующий – плавное = 15–20 мин. Режимы : 1n, 2n, 3n, 4n-выполняли на швартовых (судно без груза и балласта), продолжительность одного режима 6–8 часов, затем в ходу (в балласте или грузу) - 5n (продолжительность=12 час) и 6n (24 часа и более). Можно 1,2,3, режимы выполнять на швартовых, остальные в ходу.

3. Двигатель прогрев, масляные фильтры чистые, пробный пуск и при нормальных показаниях КИП и работе двигателя в течение 1 часа доводим до 240 об/мин, при этой частоте вращения работает 30 мин., затем останавливаем двигатель и осмотр «движения».

4. Обкатку на 1,2,3,4 режимах производим без остановок двигателя, для исключения «адгезии» (прилипания пары трения при остановке).

Режим 1n -240 об/мин., - температура газов ($T_{\text{в.г.}}$) по цилиндрам должна быть не менее 250°C. Так как разница температур между над поршневым пространством и

первым компрессионным кольцом составляет 140-150 °С, [16,17], например: $T_{в.г.}=230^{\circ}\text{C}$, при этом – T первого кольца составит – $230-140=90^{\circ}\text{C}$ и при этой температуре влага, находящаяся в поступившем в цилиндр заряде воздуха будет конденсироваться на первом кольце и стекать в картер, повреждая масляную пленку и таким образом создается «сухое» трение в этом месте. (при $250-140=110^{\circ}\text{C}$ влага испарится). На этом режиме имеем значительный износ втулка-кольцо, продукты износа попадают в картер и засоряют масляный фильтр. Давление масла до фильтра растет в течение 3-4 часов, затем имеем постоянное давление, переходим на чистый фильтр и работаем еще 3 часа. (происходит приработка поверхностей). На первом режиме проработав в сумме 6-7 часов, переходим плавно (20 мин) на режим 2п. Режимы 2п, 3п, 4п проводим аналогично первому режиму без остановки двигателя, контролируя температуру подшипников, давление масла, переходы на чистый масляный фильтр. Изменение температуры охлаждающей воды цилиндра – сигнал неудовлетворительной приработки в нем. Закончив 4 режим, останавливаем двигатель, через 30-40 минут, вскрываем картер и осматриваем «движение», пробуксовываем двигатель при подаче масла, затем осматриваем состояние цилиндрических втулок: площадь приработки, отсутствие прорыва газов, цветов побелости, глубоких рисок, чего ни разу не было обнаружено. Закрываем картер. При стоянке систематически при подаче масла пробуксовываем двигатель. Режимы 5п и 6п проводили в ходу (12 и 24 часа соответственно, по технологии режимов 1п, 2п, 3п, 4п). Температура выхлопных газов при номинальных оборотах и нагрузке не должна превышать: температура вспышки применяемого масла $+140^{\circ}\text{C}$. Пример: температура вспышки масла $=230^{\circ}\text{C}$., тогда допустимая температура выхлопных газов не должна превышать $230+140=370^{\circ}\text{C}$., иначе масло будет возгораться в 1-ом кольце, закоксовывать 1-ую канавку, 1-ое кольцо «залажет» и возможна его поломка [16,17].

Все обкатки, проведенные по вышеприведенному методу, дали положительный результат, работоспособность кольцевого уплотнения увеличилась в среднем в 2-2,5 раза по сравнению рекомендуемой на речном флоте бесступенчатой обкаткой равной 5-12 часов.

По такому методу была произведена обкатка быстроходного двигателя 6Ч12/14, мощностью 50 кВт, 1500об/мин. После замены цилиндрических втулок и всех колец. Получили хороший результат – двигатель отработал на этих втулках и кольцах без их замены порядка 6500 часов.

Используя опыт натуральных обкаток [15] и свой опыт, мы получили следующие выражения для определения общего времени для обкатки двигателя:

1. Малооборотный двигатель (МОД) – 12000 об/мин·час (8 режимов);
2. Среднеоборотный двигатель (СОД) – 15000 об/мин·час +12часов (на последнем режиме);
3. Высокооборотный двигатель (ВОД) – 18000 об/мин·час + 6часов (на последнем режиме).

Для А) и В) предпочтительно применять близко к плавной бесступенчатой обкатке на 8-14 режимах, для Б) - 6 ступенчатый режим. Все обкатки рекомендуем (кроме Б, режимы 5п и 6п) выполнять, не останавливая двигатель (адгезия!!!). Пример: нужно обкатать двигатель 6Ч12/14, 1500 об/мин. Используем выражение В) – $18000 \text{ об/мин}\cdot\text{час}/1500 \text{ об/мин}=12\text{час}+6\text{час}$. Назначаем всего 12 режимов, 11 продолжительностью 1 час и 12-ый 7 часов. Обкатка приближается к плавной бесступенчатой.

При стоянке рекомендуется периодически проворачивать двигатель при подаче смазочного масла!!!

При обкатке хорошие результаты получаются при овальности цилиндра, не превышающей 0,002 диаметра цилиндра, при овальности 0,005 диаметра цилиндра и более положительных результатов, как правило, не имеется.

Заключение

В данном исследовании был предложен алгоритм работ по обкатке, необходимой для полноценной работы двигателя. В период своей службы двигатель не раз подвергается техническому обслуживанию, ремонтным работам после которых необходимо проводить обкаточные работы, цель которых заключается в доведении характеристик двигателя до исходных, путём притирки сопрягаемых деталей. Особенно на характеристики двигателя влияет работа деталей цилиндропоршневой группы, а именно поршневых колец. Любой выем поршневого кольца из канавки поршня, например, для чистки от нагара, приводит его к незначительной пластической деформации, в силу своей конструкции. Соответственно установленное кольцо в свою поршневую канавку, не будет полноценно работать, поскольку изменённая форма не обеспечит плотного прилегания к поверхности втулки. Такого рода дефекты и устраняют при помощи обкатки. Поскольку данный технологический процесс можно назвать заключительной стадией подготовки двигателя к эксплуатации и приёма номинальной нагрузки, желательно данную операцию проводить в условиях близкой к эксплуатационным вплоть до использования топлива, которое обычно применяют в эксплуатационный период. Кроме того, необходим контроль за параметрами работы дизеля, такими как: температура выпускных газов, температура охлаждающей воды на входе в цилиндр и выходе из цилиндра, температура охлаждающей воды или масла на входе в поршень и выходе из него. При отклонении этих параметров работы обкатываемых цилиндров от норм, а также появлении необычных шумов и стуков дизель необходимо остановить, выяснить причину ненормальной работы, устранить ее и после этого принимать решение о режиме дальнейшей работы. Переход с одного режима на другой выполнять плавно, нельзя резко изменять нагрузку. Предложенный один из алгоритмов работ по обкатке двигателя позволяет гарантировать максимальную выработку своего ресурса, а при его нормальной эксплуатации – значительное превышение.

Список литературы

1. Андрусенко, С. Е., Андрусенко, О. Е., Кольванов, В. В., & Матвеев, Ю. И. (2021). Механизмы управления рабочим процессом дизельного двигателя. *Научные проблемы водного транспорта*, (68), 98-108. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.206>
2. Крагельский, И.В. и др. Основы расчетов на трение и износ. – М. «Машиностроение». – 1977.
3. Асташкевич, Б.М. Вопросы повышения износостойкости ЦПГ транспортных двигателей. – *Вестник машиностроения*. – 1976.
4. Семенов, В.С. Долговечность ЦПГ судовых дизелей / В.С. Семенов, П.С. Трофимов // – М. «Транспорт». – 1969.
5. Семенов, В.С. Теплонапряженность и долговечность ЦПГ судовых двигателей. – М. «Транспорт». – 1977.
6. Rogers, M.D. The mechanism of scuffing in diesel engines. – 1980.
7. Старосельский, А.А. Долговечность трущихся деталей машин / А.А. Старосельский, Д.Н. Гаркунов// М. «Машиностроение». – 1967.
8. Munro R., Hughes G.N., Current piston and ring practice and the problem of scuffing in diesel engine. – DE and USP. – 1970.
9. Воинов, Н.П. Выбор оптимальных условий обкатки ДВС. – *Вестник машиностроения*. – 1955.
10. Шаронов, Г.П. Применение присадок к маслам для ускорения приработки двигателей. – М. «Химия». – 1965.
11. Мишин, И.А. Долговечность двигателей. – Л. «Машиностроение» 1976.
12. Каган, С.Г. Снижение расхода ГСМ, МОД. – ЦБТНИИ, ММФ. – 1979.
13. Матвеевский, Р.М. и др. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. – М. «Наука». – 1978.
14. Сомов, В.А. Смазка судовых дизелей. – Л. «Судостроение». – 1985.

15. Владимиров, В.А. Обкатка судовых двигателей / В.А. Владимиров, А.Е. Гриншпун // М. «Транспорт». – 1982
16. Владимиров, В.А. Некоторые вопросы теории приработки ЦПГ. – ЦНИИМФ. – 1977.
17. Владимиров, В.А. Исследования и оптимизация процесса приработки ЦПГ. – Диссертация. – Одесса-Ленинград. – 1979.

References

1. Andrusenko, S. E., Andrusenko, O. E., Kolyvanov, V. V., & Matveev, YU. I. (2021). Mekhanizmy upravleniya rabochim protsessom dizel'nogo dvigatelya. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (68), 98-108. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.206>
2. Kragel'skii, I.V. i dr. Osnovy raschetov na trenie i iznos. – М. «MashinostroeniE». – 1977.
3. Astashkevich, B.M. Voprosy povysheniya iznosostoikosti TSPG transportnykh dvigatelei. – Vestnik mashinostroeniya. – 1976.
4. Semenov, V.S. Dolgovechnost' TSPG sudovykh dizelei / V.S. Semenov, P.S. Trofimov // – М. «Transport». – 1969.
5. Semenov, V.S. Teplonapryazhennost' i dolgovechnost' TSPG sudovykh dvigatelei. – М. «Transport». – 1977.
6. Rogers, M.D. The mechanism of scuffing in diesel engines. – 1980.
7. Starosel'skii, A.A. Dolgovechnost' trushchikhsya detalei mashin /A.A. Starosel'skii, D.N. Garkunov// М. «MashinostroeniE». – 1967.
8. Munro R., Hughes G.N., Current piston and ring practice and the problem of scuffing in diesel engine. – DE and USP. – 1970.
9. Voinov, N.P. Vybora optimal'nykh uslovii obkatki DVS. – Vestnik mashinostroeniya. – 1955.
10. Sharonov, G.P. Primenenie prisadok k maslam dlya uskoreniya prirabotki dvigatelei. – М. «KhimiYA». – 1965.
11. Mishin, I.A. Dolgovechnost' dvigatelei. – L. «MashinostroeniE» 1976.
12. Kagan, S.G. Snizhenie raskhoda GSM, MOD. – TSBTNII, MMF. – 1979.
13. Matveevskii, R.M. i dr. Protivozadirnaya stoikost' smazochnykh sred pri trenii v rezhime granichnoi smazki. – М. «Nauka». – 1978.
14. Somov, V.A. Smazka sudovykh dizelei. – L. «SudostroeniE». – 1985.
15. Vladimirov, V.A. Obkatka sudovykh dvigatelei / V.A. Vladimirov, A.E. Grinshpun // М. «Transport». – 1982
16. Vladimirov, V.A. Nekotorye voprosy teorii prirabotki TSPG. – TSNIMF. – 1977.
17. Vladimirov, V.A. Issledovaniya i optimizatsiya protsessa prirabotki TSPG. – Dissertatsiya. – Odessa-Leningrad. – 1979.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Матвеев Юрий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: matveevseu@mail.ru

Yuri I. Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Храмов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: m.u.hramov@yandex.ru

Mikhail Y. Khramov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Колыванов Владимир Викторович, к.т.н., доцент кафедры Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного

Vladimir V. Kolyvanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor,

транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951,
г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:
v.v.kolyvanov@yandex.ru

Курицын Сергей Юрьевич, аспирант
кафедры ЭСЭУ (Эксплуатации судовых
энергетических установок) Волжский
государственный университет водного
транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, Ул.
Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail:
kuritsyn@gckb.ru

Volga State University of Water Transport, 5,
Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Kuritsyn Sergey Yuryevich, postgraduate
student of the Department of ESEU (Operation
of Ship power plants) Volga State University
of Water Transport, 603950, Nizhny
Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail:
kuritsyn@gckb.ru

Статья поступила в редакцию 11.05.2023; опубликована онлайн 20.09.2023.
Received 11.05.2023; published online 20.09.2023.