

УДК 621.431

Заблоцкий Ю.В.
НУ «ОМА»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Постановка проблемы в общем виде. Эксплуатационные свойства топливной аппаратуры высокого давления во многом зависят от качества обработки сопрягаемых деталей, в частности прецизионной пары плунжер – втулка топливного насоса высокого давления (ТНВД). В свою очередь к показателям, характеризующим качество обработки поверхности, относятся геометрические параметры (шероховатость и волнистость) и физико-химические свойства поверхностного слоя (микротвердость, остаточные напряжения и структурный и фазовый состав). Рабочая поверхность прецизионной пары плунжер – втулка ТНВД формируется под воздействием последовательно применяемых различных технологических методов, в результате которых образовывается относительно тонкий поверхностный слой, отличающийся по своим признакам от нижележащих слоев основного металла. Состояние и свойства этого слоя фактически определяют ресурс работы, а его способность противостоять радиальным и касательным нагрузкам характеризует износостойкость сопряжения плунжер – втулка ТНВД.

Постановка проблемы. В настоящее время существуют значительное число способов уменьшения износов деталей, сопрягаемых в парах трения, которое можно подразделить на:

- а) конструктивные способы – выбор рациональных размеров и формы сопрягаемых деталей, а также рабочих зазоров между ними;
- б) технологические способы – выбор материалов деталей пар трения, обработка их поверхности;
- в) эксплуатационные способы – выбор оптимального режима работы деталей, подбор смазочного материала.

Указанные способы обеспечивают повышение качества обработки поверхностей трения, что улучшает такие их эксплуатационные свойства как износостойкость, долговечность, усталостная прочность и др. При этом рассматривается воздействие только на твердую фазу (поверхность втулки или плунжера), не учитывая, что работу трибосоединения втулка – плунжер необходимо определять как комплекс

металл (втулка) – жидкая фаза (топливо) – металл (плунжер). Взаимодействие фаз в этом комплексе взаимосвязано, а кроме того, на его функционирование влияют аномальные свойства тонкого слоя топлива, представляющего собой углеводородную структуру с макромолекулярным строением. Однако изменение именно этих свойств не всегда учитывается при проектировании и эксплуатации топливной аппаратуры высокого давления, хотя возможность их использования неоднократно доказывалась в различных исследованиях [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Из анализа научно-технической литературы [2-4] следует, что одним из современных методов модификации поверхностного слоя контактируемых деталей является нанесение регулярного микрорельефа, который облегчает оптимизацию микрогеометрии рабочих поверхностей, улучшая их эксплуатационные свойства. Однако и в этом случае не учитывается возможность управления триботехническими процессами, протекающими в паре плунжер – втулка топливного насоса высокого давления, за счет воздействия на изотропные свойства топлива, которые изменяются при нанесении на поверхность плунжера размерного микрорельефа.

Целью статьи является определение оптимального для топливной аппаратуры высокого давления способа нанесения регулярного микрорельефа и изучение комплексного взаимодействия регулярного микрорельефа и изотропных свойств топлива на эксплуатационные параметры прецизионной пары втулка – плунжер ТНВД.

Изложение материала исследования. В качестве наиболее оптимального способа нанесения регулярного микрорельефа нами был выбран способ виброобкатывания поверхности, применение которого возможно как в исследовательской лаборатории, так и в условиях судна (при соблюдении определенных технологических мероприятий). При этом процесс нанесения микрорельефа заключается в перемещении деформирующего инструмента, которому дополнительно сообщается осциллирующее колебание, по поверхности детали. Данный способ обеспечивает образование на поверхности деталей регулярных (или близких к ним) и, следовательно, аналитически рассчитываемых микрорельефов [5].

Способы виброобкатывания может иметь три основных назначения:

- 1) обработка, обеспечивающая образование заданного для различных условий эксплуатации микрорельефа поверхностей;

2) упрочняющая обработка, повышающая усталостную прочность и износостойкость поверхностей;

3) восстановление размеров деталей.

При виброобработке поверхностей, производимой при малых усилиях вдавливания инструмента (шара или конуса) происходит сглаживание микронеровностей исходной поверхности за счет деформации вершин выступов, а при увеличении усилия вдавливания происходит «выжимание» металла из основного слоя, лежащего ниже уровня микронеровностей исходной поверхности. При этом становится возможным формирование нового микрорельефа поверхности, отличающегося от исходного большими радиусами выступов и впадин и малыми углами наклона их образующих.

В настоящее время для виброобкатывания используются алмазный инструмент. Основными параметрами режима виброобкатывания являются:

1) число двойных ходов (число осцилляций деформирующего элемента в единицу времени) – n_1 ;

2) число оборотов заготовки – n_2 ;

3) продольная подача деформирующего элемента (или заготовки) – S ;

4) амплитуда осцилляции деформирующего элемента – A .

Поскольку до последнего времени виброобкатывание применялось в условиях мелкосерийного и опытного производства, для его осуществления применялись универсальные устройства – виброголовки к металлообрабатывающим станкам.

Наибольшее применение способ виброобкатывания получил для обработки цилиндрических поверхностей и поэтому большинство виброголовок спроектировано применительно к токарным станкам. В этом случае задача реализации кинематической схемы виброобкатывания существенно упрощается, так как для вращения заготовки и поступательного перемещения виброголовки с деформирующим элементом используются главное и вспомогательное движение токарного станка. В этом случае основным назначением виброголовки является осуществление осцилляционного движения деформирующего элемента, которое осуществляется механическим, электромагнитным или пневматическим приводом.

Исходный микрорельеф трущихся поверхностей определяет не только длительность приработки и первоначальный износ, но и скорость нормального изнашивания. Это вытекает не только из дискрет-

ности контактирования трущихся поверхностей, но и связано с решающим влиянием на их изнашивание таких факторов, как несущая поверхность, маслоемкость при работе со смазкой, способность удерживать при трении всухую твердые частицы, вызывающие абразивный износ. Эти факторы оказывают влияние не только на скорость изнашивания, но и на такие характеристики трения как коэффициент трения, температура узла трения и др.

Одним из основных факторов, приводящих к уменьшению износа виброобкатанных поверхностей, является (помимо увеличения их маслоемкости) возникновение гидродинамической подъемной силы в слое жидкости, разделяющей поверхности трения, и интенсификация структуры в топливной пленке [1, 6].

Проведем для случая виброобкатанного плунжера топливного насоса оценку обеих составляющих данного эффекта. Анализ выполним используя схему, показанную на рис. 1.

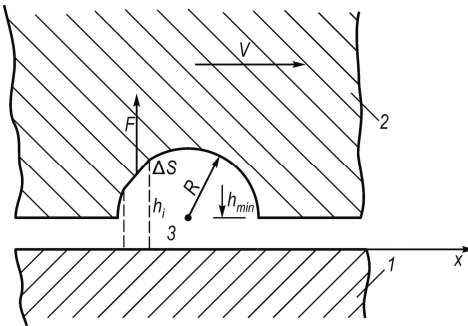


Рис. 1. Продольный разрез плунжера с нанесенной канавкой и характер действующих сил в этой плоскости: 1 – участок плунжера; 2 – участок втулки; 3 – разделяющий слой топлива

Рассмотрим элементарную площадку ΔS на криволинейной поверхности канавки радиусом кривизны R , образованной на поверхности плунжера при виброобкатывании. При перемещении плунжера со скоростью V на рассматриваемую площадку будет действовать со стороны жидкости гидродинамическая подъемная сила F , причем наличие регулярного микрорельефа на поверхности плунжера приводит к когерентному сложению всех гидродинамических подъемных сил, возникающих на канавках виброобкатки [6].

Суммарную сила P , действующая на единичный отрезок длины плунжера, может быть определена как

$$P = \left(\pi D \int_{x_1}^{x_2} F dx \right) n = \pi D \frac{4,9\mu VR}{h_{\min}} n,$$

где D – диаметр плунжера,

μ – вязкость смазочного материала,

h_{min} – минимально расстояние между плунжером и втулкой.

n – число канавок на единичном отрезке длины плунжера.

Оценка суммарной величины силы P , отжимающей плунжер от поверхности втулки, проведенная по формуле для плунжеров топливных насосов 6L42MC, дает значение $P = 80 \text{ кг/см}^2$ [3].

В работе были подвергнуты исследованию микрорельефы, имеющие косо-винтовые канавки. Нанесение такого микрорельефа на боковую поверхность плунжера топливного насоса можно произвести на стандартных токарно-винторезных станках, используя дополнительную оснастку.

Для нанесения регулярного микрорельефа используется устанавливаемое в резцедержателе приспособление (рис. 2) состоящее из корпуса 1 с приваренной к нему пластиной 2, служащей для зажима приспособления в резцедержателе токарного станка.

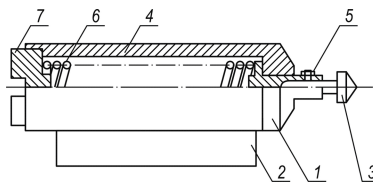


Рис. 2. Приспособление для нанесения регулярного микрорельефа на боковую поверхность плунжеров топливных насосов высокого давления

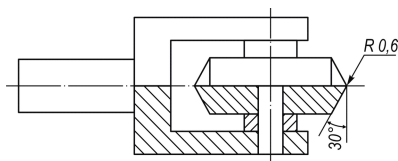


Рис. 3. Схема твердосплавного выглаживателя

Инструмент для нанесения микрорельефа 3 укрепляется в цилиндрическом держателе 4 и фиксируется винтом 5. Пружина 6 и гайка 7 обеспечивают необходимое давление выглаживателя на обрабатываемый плунжер.

Твердосплавный выглаживатель может быть изготовлен по схеме, показанной на рис. 3. Все размеры, кроме радиуса закругления диска, который принимается равным $R = 0,6$ мм, могут быть выбраны произвольно. Материал выглаживателя – сталь с твердостью HRC62. Поверхность выглаживателя обрабатывается до 12 класса чистоты поверхности.

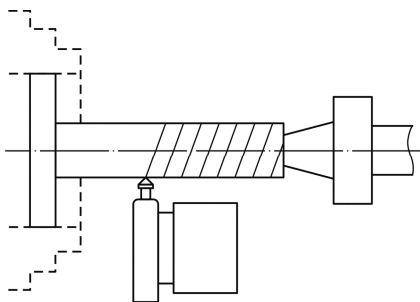


Рис. 4. Схема нанесения регулярного микрорельефа на поверхность плунжера ТНВД на токарном станке

Для нанесения регулярного микрорельефа обрабатываемый плунжер устанавливается в патрон токарного станка и подпирается центром (рис. 4).

К плунжеру подводится приспособление с выглаживателем, отрегулированным на определенное давление. Нанесение регулярного микрорельефа производится при числе оборотов шпинделя $n = 50 \dots 100$

об/мин и продольной подаче выглаживателя $S = 0,7 \dots 0,9$ мм/оборот.

Давление выглаживателя на плунжер подбирается обычно экспериментально на пробном плунжере таким образом, чтобы обеспечить свободный ход обработанного плунжера во втулку топливного насоса, т.е. чтобы высота навалов, образующихся вдоль наносимых канавок, не превышала $0,5 \dots 1$ мкм. Обычно усилие выглаживателя составляет $100 \dots 300$ Н. В том случае, если нанесение регулярного микрорельефа производится с целью восстановления гидростатической плотности, давление на выглаживатель должно быть увеличено, чтобы высота навалов стала большей и скомпенсировала утерянный размер плунжера. В этом случае после операции нанесения регулярного микрорельефа, необходимо дополнительно проводить шлифовку плунжера к втулке.

Нанесение регулярного микрорельефа интенсифицирует формирование ориентационно-упорядоченного пристенного слоя топлива, дает сильное сцепление слоев топлива с опорной поверхностью и является фактически механическим методом управления ориентацией молекул [7].

Рассмотрим два основных предельных случая ориентации молекул топлива относительно микрорельефа (планарная и гомеотропная структура). В случае возникновения гомеотропной структуры молекул топлива в граничном слое (когда оси молекул располагаются перпендикулярно канавкам микрорельефа поверхности плунжера) при совершении хода нагнетания требуется затрата дополнительной энергии, так как между ориентированным слоем топлива и поверхностью металла имеет место сильное сцепление. При планарной ориентации (в случае, когда оси молекул расположены параллельно по-

верхности плунжера) такой энергии не требуется, и, следовательно, она является энергетически более выгодной.

Испытания топливных насосов высокого давления с нанесенным на поверхности плунжера микрорельефом производились на судовом дизеле 6L42MC.

На двух новых плунжерах топливных насосов наносился регулярный микрорельеф в виде косых винтовых канавок (рис. 5). Такой же микрорельеф наносился на двух отбракованных плунжерах, использование которых было прекращено из-за повышенного износа их поверхностей. Два плунжера использовались в качестве контрольных. Общая наработка при проведении эксперимента составила 3150 часов.

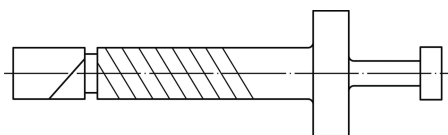


Рис. 5. Косые винтовые канавки, нанесенные на поверхность плунжера ТНВД

После проведения виброобработки и доводки поверхностей плунжеров на них нарезаются контрольные лунки по методу искусственных баз. Нарезание поясов лунок производилось в 6-ти поясах. В каждом поясе нарезаются две лунки, распо-

ложенные в одной диаметральной плоскости.

После установки плунжерных пар до момента первого контроля их износа двигатель проработал 910 часов, в них около 95% на тяжелом топливе, до второго контроля – 2250 часов, из них около 95% на тяжелом топливе, до третьего контроля 3150 часов, из них около 90% на тяжелом топливе.

На рис. 6 приведены результаты износа плунжеров, представляющих собой значение среднего износа, измеренного в 6-ти поясах на 12-ти контрольных точках.

Как видно из рис. 6, протекание износа плунжерных пар во времени носит обычный характер, причем износ контрольных плунжеров значительно превышает износ виброобработанных плунжеров, как новых, так и восстановленных с помощью нанесения регулярного микрорельефа после отбраковки.

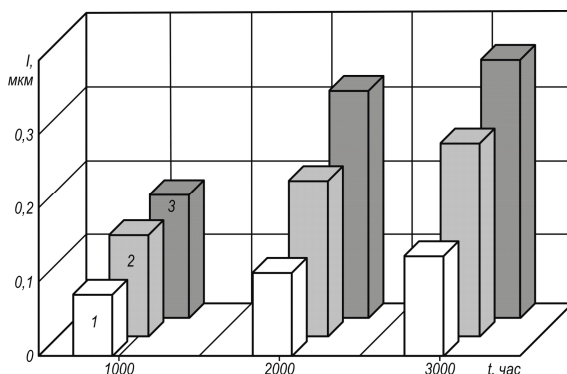


Рис. 6. Средний износ плунжеров за время проведения эксперимента: 1 – новый плунжер с нанесением регулярного микрорельефа; 2 – плунжер, восстановленный нанесением регулярного микрорельефа; 3 – контрольный плунжер

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Полученные результаты проведения натурных испытаний плунжерных пар топливных насосов дизелей 6L42MC, эксплуатируемых на тяжелом топливе, позволяют утверждать следующее:

1) средний линейный износ контрольных плунжеров, на поверхность которых упорядоченный микрорельеф не наносился, превышает износ плунжеров, на поверхности которых наносился микрорельеф, примерно в 2,1...2,6 раза;

2) восстановленные виброобработкой (из отбракованных) плунжера топливных насосов выдержали более 3000 часов эксплуатации, что соответствует примерно 30% от срока нормальной эксплуатации новых плунжерных пар на тяжелом топливе;

3) возможно предположить, что нанесение регулярного микрорельефа с целью повышения износостойкости можно проводить не только для плунжерных пар ТНВД, но и для игл распылителей;

4) воздействие на изотропные свойства топлива за счет создания регулярного микрорельефа приводит к увеличению ресурса работы топливной аппаратуры высокого давления.

Дальнейшие исследования предполагаются в направлении изучения влияния расклинивающего давления, образующегося в районе нанесения регулярного микрорельефа, а также влияния двухпрофильного микрорельефа (на поверхности плунжера и внутренней поверхности втулки) на износ плунжерных пар ТНВД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заблоцкий Ю. В. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей / Ю. В. Заблоцкий, В. Г. Солодовников // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 46-56.
2. Кочин А. Н. Влияние регулярного микрорельефа на эксплуатационные показатели деталей машин / А. Н. Кочин, Желонкин М. В., Головин А. А. // Сб. трудов Нижегородского ГТУ. – 2015. – № 3 (110). – С. 104-109.
3. Пушкарев Д. В. Формирование регулярного микрорельефа в отверстиях малого диаметра / Д. В. Пушкарев, И. В. Батинов // Сб. ст. по материалам XXXIII междунар. науч.-практ. конф. № 4 (29). Новосибирск: СибАК, 2014. – С. 87-96.
4. Буканова И. С., Моделирование процесса накатывания частично регулярного микрорельефа при определении его фактической площади / И. С. Буканова, И. И. Ятло // Ползуновский вестник. – № 1 (1), 2012. – 46-50.
5. Шнейдер Ю. Т. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Т. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1982. – 248 с.
6. Заблоцкий Ю. В. Определение механических нагрузок в парах трения топливной аппаратуры судовых дизелей / Ю. В. Заблоцкий // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2014. – № 2. – Одесса : ОНМУ. – С. 71-78.
7. Сагин С. В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей / С. В. Сагин, Ю. В. Заблоцкий // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.