

**Кротик И. А.,**  
старший преподаватель,  
кафедра судовых энергетических установок,  
Национальный университет кораблестроения  
им. адмирала Макарова, г. Николаев, Украина

**Боду С. Ж.,**  
старший преподаватель,  
кафедра инженерной механики и технологии машиностроения,  
Национальный университет кораблестроения  
им. адмирала Макарова, г. Николаев, Украина

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕСУРС ДИЗЕЛЕЙ

*Произведен анализ влияния точности и шероховатости отверстий сопловых устройств на долговечность форсунок судовых дизелей. Описаны основные причины выхода из строя топливных форсунок и способы решения этих проблем, что приведет к более устойчивым режимам эксплуатации ДВС и повышению ресурса силового устройства. Приведены наиболее прогрессивные, на сегодняшний день, технологические приемы изготовления, выглаживания и доводки кромок, которые чаще всего труднодоступны, а иногда, из-за высокой твердости, не могут быть обработаны лезвийным режущим инструментом. Рассмотрен пример реализации достижения цели с помощью станков фирмы «Sodick».*

**Ключевые слова:** точность обработки; шероховатость; выглаживание поверхностей; сопловое отверстие; форсунка; распылитель; ЭХО.

Повышение точности обработки деталей в отдельных случаях может дать существенные результаты. Так, если бы отверстия распылителей форсунок современных двигателей удалось сделать с точностью до 0,1 мкм, это дало бы возможность увеличить моторесурс дизеля в 2–3 раза [1].

Создание пар трения втулка-вал и корпус-шток с диаметром рабочей поверхности больше одного миллиметра особых затруднений не представляет, с технологической точки зрения, за исключением, применяемой ручной операции – притирки, которая требует значительного опыта, малопроизводительного оборудования и дорогих притирочных материалов.

Но когда речь идет об изготовлении отверстий диаметром от 0,1 до 1,0 мм (а именно такие отверстия в распылителях современных дизелей), здесь технологических возможностей, существующего оборудования и инструмента недостаточно [2].

Для получения указанных отверстий применяются высокооборотные ( $6 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ ) сверлильные станки с фиксированным регулируемым моментом сверления [3].

Однако и такая мера не гарантирует сохранность режущего инструмента. А самое важное – это недостаточная шероховатость обработанной поверхности, которую затем «выглаживают» с помощью прокачки масла с абразивом по отверстиям, без гарантии обеспечения круглости и цилиндричности или электрохимическим травлением.

Совершенно очевидно, что со времен И. И. Ползунова (1728–1768), который проектировал свою первую паровую машину и измерял зазоры в парах трения

Екатерининским пятакон (толщина 5 мм) мир технологии изменился. Сегодня существуют прецизионные пары, обработанные с точностью 0,2–0,3 мкм, что потребовало значительных усилий по созданию технологического оборудования и средств контроля обработанных поверхностей. Поиски новых технических решений продолжают.

Мы задались целью установить, насколько актуален этот вопрос сегодня, и чего достигла технология за последние 10–20 лет.

**Анализ достижений и актуальность проблемы.** Для образовавшихся тонких окисных пленок, порядка нескольких микрометров, используют анодное травление. Для относительно толстых окисных пленок (до 0,3–0,5 мм) применяют катодное травление. В отдельных случаях, например при травлении деталей с малыми сечениями, применяют биполярное травление [6]. В любом случае при подаче напряжения на электроды начинается процесс растворения металла детали, являющейся анодом.

Растворение металла протекает главным образом на выступах микронеровностей (или просто неровностей), оставленных режущим инструментом на предыдущей технологической операции. Поскольку толщина окисной пленки на выступах меньше, чем во впадинах, то и плотность тока на вершинах более высокая.

В результате избирательного растворения, т. е. большей скорости растворения выступов, микронеровности сглаживаются и поверхность детали приобретает характерный металлический блеск. Полирование таким образом не избавляет обработанную деталь

от забоин, царапин и других дефектов силового воздействия на нее в процессе механической обработки лезвийным инструментом (рис. 1) [5].

Следовательно, в соплах могут остаться участки, которые послужат в дальнейшем очагами начала кок-

сования отверстия, нарушив качество и однородность распыления, дальнобойность и конусность факела топлива, и, как результат, полноту сгорания, характер отвода тепла за цикл [9].

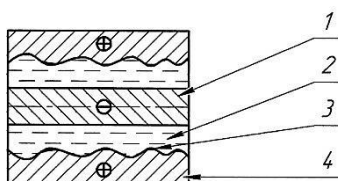


Рис. 1. Схема электрохимического полирования:

1 – электрод-инструмент; 2 – электролит; 3 – окисная пленка; 4 – деталь-анод

В большинстве случаев это ведет к ухудшению сгорания и растягиванию его во времени, что в свою очередь вызывает повышение теплоотвода, увеличе-

ние потерь на недогорание, разрушение отверстия сопла на выходе, снижение индикаторного и эффективного КПД, (рис. 2).

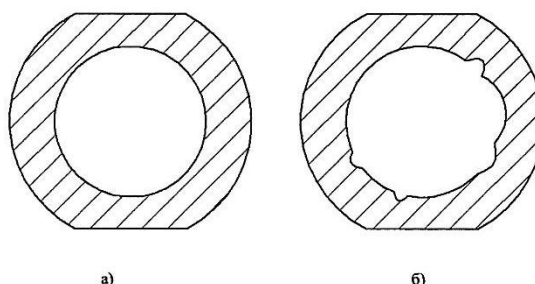


Рис. 2. Внешний вид соплового отверстия на выходе: а) – новая форсунка; б) – отработавшая 3000 ч.

**Цель и задание исследования** – оценить влияние технологических факторов на надежность и долговечность дизелей, в частности, деталей топливной системы.

**Изложение основного материала исследования.** Известно, что точность поверхности напрямую связана с ее качеством, т. е. шероховатостью. Иными словами, чем точнее обработанная поверхность, тем меньше должна быть шероховатость. Поэтому мы считаем, что главным и определяющим критерием работы отверстий распылителя является все же не точность на уровне 0,1 мкм, а шероховатость с этим параметром.

Точность отверстий распылителя, (а их в современных дизелях от 1 до 12 на одну форсунку, равнорасположенных по образующей наконечника), влияет на качество распыления топлива, но значительно меньше, чем шероховатость канала (отверстия) по которому оно доходит.

И вот почему. На надежность ДВС влияет комплекс эксплуатационных характеристик топлив: плотность, вязкость, кислотность и пр., вызывающие повышение износа элементов топливной аппаратуры, цилиндропоршневой группы и особенно сопловых отверстий, которые имеют малые сечения, а поэтому под воздействием избыточного давления скорость истечения достигает звуковой.

Содержание в топливе серы, золы, ванадия, натрия, кокса, алюмосиликатов, механических примесей, воды вызывает различные виды коррозии, приводит к образованию всевозможных отложений, уменьшает сроки эксплуатации и межремонтные периоды элементов дизеля.

То есть, чем более гладкая поверхность отверстия распылителя, тем меньше вероятность «зацепиться»

на ней находящимся во взвеси топлива примесям, а значит, исключается возможность образования облитерации (коксования) отверстия.

Сопло форсунки из-за большой скорости протекания топлива через отверстия и наличия в нем твердых частиц изнашивается – увеличивается диаметр, а на выходных кромках отверстий образуются неровности в виде зазубрин (рис. 2). Уже после 500–600 часов работы сопла диаметр сопловых отверстий увеличивается на 9...10 мкм, но нарушений формы отверстий за это время не обнаруживается [3; 4; 8].

Правильная цилиндрическая форма отверстий нарушается вследствие большой разработки отверстий в отдельных местах по причине неоднородности металла, некачественного сверления или прошивки электроискровым способом.

Разработка сопловых отверстий и искажение их правильной цилиндрической формы влияет на протекание рабочего процесса. С износом отверстий искажается форма факела распыляемого топлива, что ухудшает процесс смесеобразования и процесс горения. Двигатель начинает работать с дымным выхлопом, увеличивается расход топлива [8; 9]. Вследствие износа отверстий сопла форсунки, изменяется расход топлива через сопловые отверстия. Объемный расход топлива  $dv$  через сопловые отверстия в данный момент времени  $t$ , выражается уравнением:

$$dv = \mu_c f_c u_c dt, \quad (1)$$

где  $\mu_c$  – коэффициент истечения топлива через сопло форсунки;

$f_c$  – суммарное эффективное сечение всех отверстий сопла форсунки;

$u_c$  – скорость истечения топлива из сопла;

При известном суммарном сечении сопловых отверстий и перепаде давления, при котором происходит истечение топлива, можно определить коэффициент истечения  $\mu_c$ , который учитывает разницу в расходе топлива, определяемом по уравнению Бернулли, и действительным расходам, по следующему уравнению:

$$\mu_c f_c = \frac{Q}{\sqrt{2g\Delta p Y_T t}} \text{ мм}^2, \quad (2)$$

где  $Q$  – расход топлива через сопло, г/сек;  
 $\mu_c f_c$  – эффективное сечения сопла форсунки, мм<sup>2</sup>;  
 $g$  – ускорение силы тяжести, см/сек<sup>2</sup>;  
 $\Delta p$  – перепад давления между средой, куда происходит истечение, и давлением, при котором происходит истечение топлива, кг/см<sup>2</sup>;

$Y_T$  – удельный вес топлива, г/см<sup>3</sup>;

$t$  – время истечения, сек.

Величина  $\mu_c$  зависит от формы соплового отверстия, шероховатости его стенок, состояние входных и выходных кромок [9]. Для новых сопел  $\mu_c = 0,6 - 0,85$ . После длительной работы сопла  $\mu_c$  уменьшается в связи с ухудшением состояния кромок сопловых отверстий (рис. 2).

Что касается точности, то при прохождении по отверстиям распылителя всех указанных выше примесей с громадной скоростью, – отверстия очень скоро изменяют свой размер – их «прошлифует» топливо, проходящее при давлении более 20 МПа и времени подачи 0,002 с [9].

При износе сопловых отверстий форсунки до 25 %, что соответствует по времени работе двигателя 3000–3500 часов, с начальным средним диаметром  $d_c = 0,35$  мм, не происходит значительного изменения как параметров рабочего процесса, так и эксплуатационных показателей, т. к. качество распыления топлива при таких износах остается достаточно хорошим, мало влияющим на процесс горения. Параметры рабочего процесса, мощность и экономичность двигателя изменяются при износе сопловых отверстий в указанных пределах на 3–5 % [8], что не может существенно оказаться на его работе.

В более поздней работе [9], авторы считают, что если отверстие имеют овал или их диаметры увеличились больше чем на 10 %, то сопло и весь распылитель необходимо менять. Следовательно, и в этом вопросе есть разногласия, но речь идет об изменении размера, а не шероховатости, что и подтверждает наше предположение. Нет необходимости изготавливать отверстия с точностью 0,1 мкм. Хотя допуск отверстий одного распылителя должен быть высок, имея технико-экономическое обоснование.

Наиболее прогрессивными, на сегодняшний день, технологическими приемами, с помощью которых можно получить высокое качество обработанных сопловых отверстий являются [5; 6]:

– анодно-механическое полирование (шероховатость  $0,08 \div 0,02$  мкм по  $Ra$ );

– электрохимическое хонингование (шероховатость  $0,16 \div 0,02$  мкм по  $Ra$ ).

Кроме того, необходимы инструменты-электроды, с помощью которых можно было бы исполнить подобные технологические операции, которые в отличие от традиционных процессов механической обработки резанием, когда сверло, оказывая силовое воздействие на обрабатываемую поверхность, образует на ней деформированные (напряженные) слои металла, электрохимическая обработка не вызывает в поверхностных слоях обрабатываемого металла каких-либо механических напряжений, что в ряде случаев положительно сказывается на качестве обрабатываемых поверхностей.

Распылители форсунок должны иметь твердость до 60 HRC для сопротивления износу от прокачиваемого топлива. А поэтому по традиционной технологии отверстия сверлят, деталь термообрабатывают, а затем шлифуют. С помощью ЭХО можно обрабатывать отверстия в размер в материалах любой твердости, лишь бы они были электропроводны. Для нашего конкретного случая более подойдет координатно-прошивочный электроэрозионный станок фирмы «Fine Sodick» мод А30R с точностью обработки  $\pm 0,005$  мм и шероховатостью обрабатываемой поверхности – 0,01 мкм по  $Ra$  [7].

**Выводы.** 1. Точность обработки сопловых отверстий, в указанных допусках  $\pm 0,01$  мкм в настоящее время может быть получена на станках фирмы «Sodick» ( $\pm 0,005$  мм). Но в этом нет необходимости из-за чрезвычайно малого влияния изначальной точности на качество распыления.

2. Шероховатость поверхности отверстий, постоянство их структуры материала и твердости во многом определяют долговечность работы распылителя (HRC  $58 \pm 2$ ,  $Ra$   $0,02 \div 0,08$  мкм).

3. Поскольку сопловое отверстие склонно к облитерации на входе и на выходе, то целесообразно острые кромки его притупить механически (но это не всегда возможно и доступно), или с помощью ЭХО на станках, которые снимают заусенцы.

4. Из-за релаксации пружины форсунки, подработки контактных поясов седел, происходит падение давления распыления. Форсунки «льют» топливо, в котором много серы, последняя, соединяясь с водой, и образуя серную кислоту, разрушает выходное отверстие распылителя. Это и есть основной причиной «разрыхления» отверстий на выходе сопла и последующее за ним коксование.

5. Для устранения недостатков по п.4 целесообразно изготавливать распылители форсунок из жаропрочной, термообрабатываемой и кислотоустойчивой стали, что приведет к увеличению межремонтного ресурса форсунки в целом.

Все перечисленные мероприятия, приведут к устойчивым режимам эксплуатации ДВС и повышению ресурса силового устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Канарчук В. Е. Надійність машин [Текст] / В. Е. Канарчук, С. К. Палянський, М. М. Дмитрієв. – К. : «Либідь», 2003. – С. 10.
2. Миклос А. Г. Судовые двигатели внутреннего сгорания [Текст] / А. Г. Миклос, Н. Г. Чернявская, С. П. Червяков. – Л. : Судостроение, 1986. – С. 350–353.

3. Рохлин А. Г. Технология производства судовых дизелей [Текст] / А. Г. Рохлин. – Л. : Судостроение, 1968. – С. 288–289.
4. Астахов И. А. Подача и распыление топлива в дизелях [Текст] / И. А. Астахов и др. – М. : Машиностроение, 1972. – 357 с.
5. Саушкин Б. П. Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве [Текст] / Б. П. Саушкин // Металлообработка. – № 1(13). – 2003. – С. 8–17.
6. Байсаров И. А. Электрохимическая обработка металлов [Текст] / И. А. Байсаров. – М. : Высшая школа, 1981. – С. 9–11.
7. www.Sodick\_euro.ru. Электроэрозионные (электроискровые) станки. Электроэрозионная (электроискровая) обработка.
8. Гиттис В. Ю. Теоретические основы эксплуатации судовых дизелей [Текст] / В. Ю. Гиттис и др. – М. : Транспорт, 1965. – С. 120–200.
9. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания [Текст] / И. В. Возницкий, Н. Г. Чернявская. – М. : Транспорт, 1974. – С. 135.

**І. О. Кротик, С. Ж. Боду,**

*Національний університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна*

#### **ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РЕСУРС ДИЗЕЛІВ**

*Проведено аналіз впливу точності і шорсткості отворів соплових пристроїв на довговічність форсунок судових дизелів. Описано основні причини виходу з ладу паливних форсунок і способи вирішення цих проблем, що призведе до більш стійких режимів експлуатації ДВС і підвищення ресурсу силового пристрою. Наведено найбільш прогресивні, на сьогоднішній день, технологічні прийоми виготовлення, вигладжування і доведення крайок, які найчастіше важкодоступні, а іноді, через високу твердість, не можуть бути оброблені лезовим ріжучим інструментом. Розглянуто приклад реалізації досягнення мети за допомогою верстатів фірми «Sodick».*

**Ключові слова:** *точність обробки; шорсткість; вигладжування поверхонь; соплові отвори; форсунка; розпилювач; ЕХО.*

**I. A. Krotik, S. Z. Bodou,**

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine*

#### **TECHNOLOGICAL ASPECTS AND THEIR IMPACT ON LIFE DIESEL ENGINES**

*The effect of accuracy and roughness of nozzle holes on the durability of the injector device of marine diesel engines. The basic reasons for the failure of the fuel injector and the ways of solving these problems, which will lead to more sustainable modes of operation of the engine and increase the resource of the power device. It provides the most advanced to date, the technological manufacturing techniques, smoothing and polishing the edges, which are often difficult to reach, and sometimes, due to the high hardness, cannot be handled by the blade cutter. An example of the implementation of the goal with the help of the company machines «Sodick».*

**Key words:** *precision machining; surface roughness; smoothing surfaces; nozzles; nozzle; spray; ECT.*