

ВЛИЯНИЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА В ТВЕРДОМ СМАЗОЧНОМ ПОКРЫТИИ, НАНЕСЕННОМ НА ЮБКИ ПОРШНЕЙ, НА ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ

Ю.Н. Цветков, д.т.н., проф., С.А. Сабуров, асп.
Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций
А.А. Татулян, асп.
ООО «ВМПАВТО»

Проведен сравнительный анализ эффективных показателей работы дизеля при нанесении на юбки поршней твердого смазочного покрытия (ТСП), состоящего из полимерного связующего с добавкой дисульфида молибдена (MoS_2) и без нее. Установлено, что покрытие с MoS_2 приводит к повышению индикаторного КПД дизеля, тогда как механический КПД практически не изменяется. Удельный эффективный расход топлива, снижается примерно на 5 %. Предполагается, что причиной положительного влияния дисульфида молибдена на индикаторный КПД двигателя является попадание частиц дисульфида молибдена с маслом в камеру сгорания и их каталитическое воздействие на ускорение процесса горения топлива.

Твердые смазочные материалы находят широкое применение в узлах трения современных машин. Они незаменимы для узлов трения, работающих в агрессивных средах и вакууме в широком диапазоне изменения температур и давлений. Наибольшее применение в качестве твердых смазочных материалов получили графит и дисульфид молибдена (MoS_2) [1], имеющие слоистую структуру. Указанные вещества в виде порошков добавляют в масла и пластичные смазки, вводят в качестве добавок в самосмазывающиеся материалы на полимерной основе (антифрикционные пластмассы), а также применяют в составе твердых смазочных покрытий (ТСП), наносимых тонким слоем на поверхности трения, например, вкладышей подшипников скольжения, зубчатых передач, на сепараторы подшипников качения и т. п.

ТСП состоят из связующего и наполнителя — дисперсного порошка твердого смазочного материала [2, 3]. Чаще всего наполнителем служит MoS_2 , а связующим — полимеры на основе фенолформальдегидной или эпоксидной смолы, например, клеи БФ-2, БФ-4 или эпоксидный лак ЭП-074 [4]. ТСП в виде указанной суспензии наносят на поверхность детали, а затем подвергают отверждению термической обработкой.

ТСП, содержащие MoS_2 , наносят, в том числе, и на юбки (тронки) поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [5]. Обычно в этом случае ТСП служит в качестве приработочного покрытия. Вместе с тем опыт эксплуатации показывает, что при соблюдении технологии нанесения ТСП сохраняется на юбках поршней и после года эксплуатации. Отличительная особенность применения ТСП на поршнях ДВС состоит в том, что оно может оказывать влияние не только на трибологические характеристики пар трения цилиндропоршневой группы, но и на рабочие показатели процесса ДВС, например, препятствуя отводу тепла от поршня в стенки втулок цилиндров. Однако, несмотря на широкое распространение практики нанесения ТСП на поршни ДВС, в научной литературе немного информации о том, оказывает ли содержащийся в ТСП дисульфид молибдена влияние подобного рода и, если оказывает, в чем оно заключается, и каков его механизм.

Цель работы: анализ влияния MoS_2 в ТСП, нанесенном на юбку поршней, на эффективные показатели работы дизеля.

Методика проведения экспериментов

Испытания проводились на стенде с двухцилиндровым дизелем воздушного охлаждения 2Ч10,5/12 [6] номинальной мощностью 22,1 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2000 об/мин. При испытаниях использовалось моторное масло Лукойл Супер SAE 15W-40 API CF-4/SG Mineral.

Программой работ предусмотрены испытания поршней с нанесением ТСП двух составов: суспензия порошка MoS_2 со средним размером частиц около 1,5 мкм в связующем на основе фенолформальдегидной смолы; связующее на основе фенолформальдегидной смолы без твердосмазочного наполнителя.

Поршни были изготовлены из алюминиевого сплава АК12М2МгН. Юбку каждого поршня перед нанесением покрытия зачищали до появления ровного металлического блеска с помощью дисковой проволочной щетки, изготовленной из стальной латунированной проволоки.

Покрытие на поршни наносили пульверизатором под давлением сжатого воздуха 0,3 МПа в два слоя, каждый из которых сушили в течение 20 мин при комнатной температуре, а затем стабилизировали в печи при температуре 150 °С в течение 1,5 ч. После термостабилизации соотношение (по массе) MoS₂ к связующему в покрытии составляло примерно 1:1. Качество нанесенного покрытия оценивалось по внешнему виду, степени отверждения и толщине. Средняя толщина покрытия составила 10 мкм (рис. 1).

К испытаниям готовили приработанные поршни с поршневыми кольцами. В процессе испытаний проводили измерения расхода топлива, температуры стенок цилиндров и отработавших газов, регистрировали индикаторные диаграммы. Во время испытаний поддерживали постоянными: частоту вращения коленчатого вала дизеля (1600 ± 15 об/мин), температуру масла в картере (90 ± 2 °С), воздуха для обдува цилиндров (30 ± 2 °С) и воздуха, подаваемого в двигатель (30 ± 2 °С). Индикаторный и механический КПД рассчитывали по результатам индицирования и измерения эффективной мощности дизеля. Дополнительно для оценки механических потерь и давления в конце сжатия коленчатый вал двигателя прокручивали от электродвигателя без подачи топлива [7].

Эксперименты по исследованию влияния ТСП на работу дизеля проводили в две серии: сначала с использованием поршней без покрытия, а затем — с ТСП. Каждая серия включала пять двухчасовых циклов, состоящих из работы на установившихся режимах с нагрузкой 25, 50 и 75 %

от номинальной мощности дизеля, и последующей прокрутки коленчатого вала дизеля с помощью электродвигателя. После каждой серии испытаний поршневые кольца промывали, сушили и взвешивали на аналитических весах с точностью 0,1 мг и определяли износ колец по потерям их массы.

Осмотр поршней после проведения испытаний показал, что на покрытии, содержащим MoS₂, не было обнаружено нарушений сплошности: поверхность его осталась ровной, а цвет — равномерным темно-серым. На покрытии, состоящим из одного связующего, были обнаружены участки повреждения (отслоения) общей площадью 1–2 см²; влиянием которых на результаты эксперимента можно пренебречь.

Результаты испытаний и их анализ

Результаты испытаний показали существенное увеличение эффективного КПД двигателя, укомплектованного поршнями с покрытием, содержащим MoS₂ (рис. 2, а). Причем КПД и экономия топлива возрастали с увеличением мощности: если при мощности, равной 25 %, снижение удельного расхода топлива составило ~1 %, то на мощности, равной 50 %, — более 2 %, на 75 % — более 5 %.

Как видно из рис. 3, а, увеличение эффективного КПД при испытании поршней с ТСП, содержащим MoS₂, достигнуто в основном за счет увеличения индикаторного КПД, тогда как механический КПД практически не изменился и даже имел тенденцию к снижению: в среднем в исследуемом диапазоне мощностей на 1 %. То, что указанную тенденцию нельзя отнести к погрешности эксперимента, подтвердили результаты

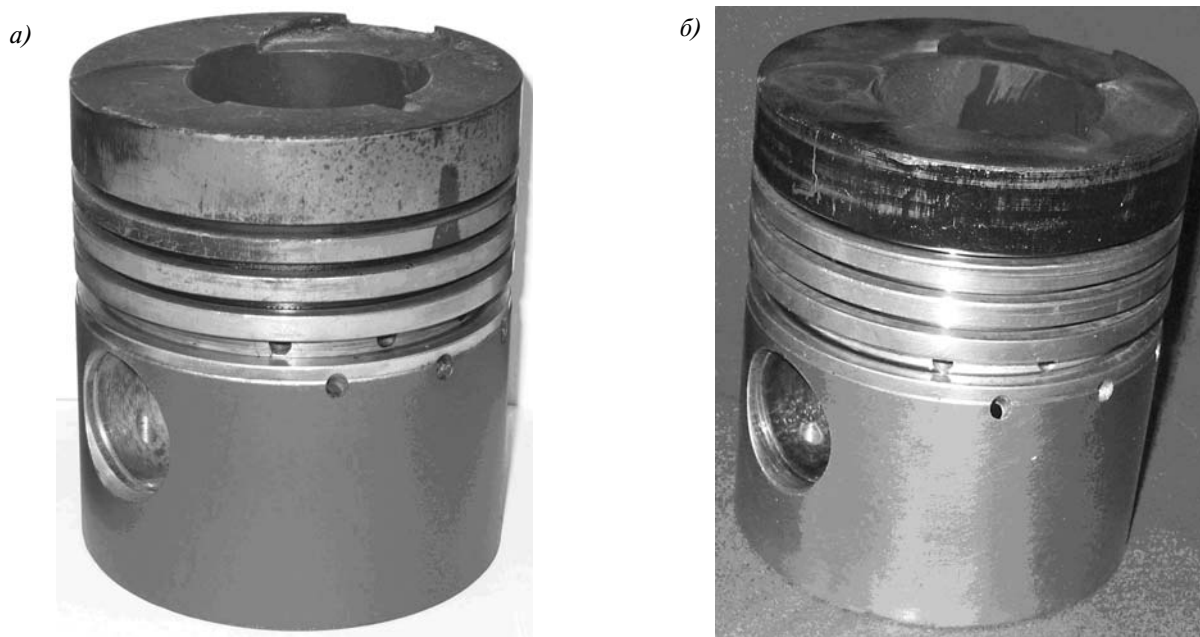


Рис. 1. Вид поршня после нанесения на юбку ТСП с дисульфидом молибдена (а) и ТСП, состоящего из одного связующего (б)

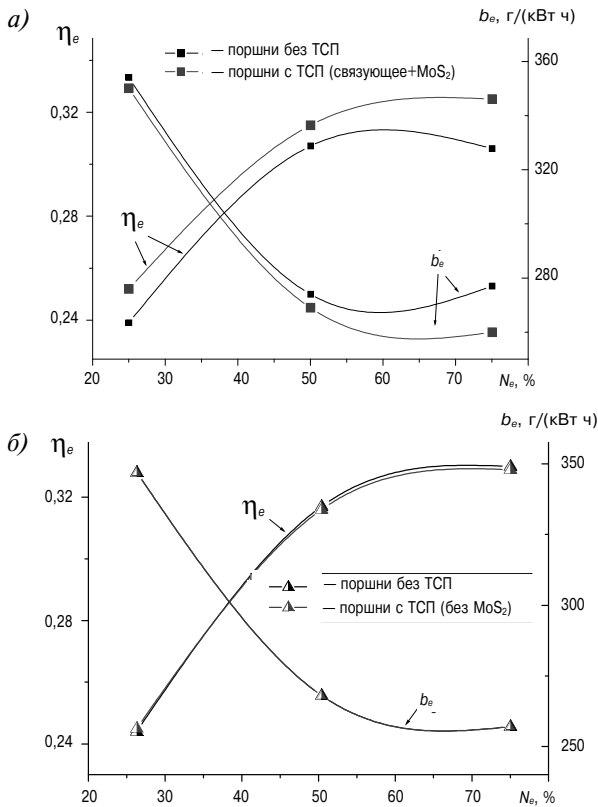


Рис. 2. Влияние ТСП, содержащего MoS_2 (а), и без MoS_2 (б) на эффективный КПД и удельный эффективный расход топлива в зависимости от мощности двигателя

измерения механических потерь при прокручивании коленчатого вала дизеля от электродвигателя (рис. 4, а). Механические потери в дизеле, определенные методом прокрутки при установке поршней с покрытием, содержащим MoS_2 , увеличились в среднем на 5 %.

Известно, что на индикаторный КПД влияет множество факторов [8]: теплообмен со стенками цилиндров, полнота сгорания топлива и др. Можно было бы предположить, что повышение индикаторного КПД (рис. 3 а) произошло за счет снижения отвода тепла через юбку поршня в стенку цилиндра, так как коэффициент теплопроводности полимерного связующего ТСП на порядок ниже, чем у силумина, из которого изготовлены поршни.

Для проверки этого предположения были проведены эксперименты на поршнях с покрытием из одного связующего. Результаты эксперимента показали (рис. 2, б и 3, б), что эффективный КПД дизеля оказался практически нечувствительным к присутствию на юбках поршней ТСП, не содержащего MoS_2 . При этом влияние ТСП без MoS_2 на механический и индикаторный КПД противоположно влиянию ТСП с добавкой MoS_2 : индикаторный КПД несколько снизился, а механический имеет тенденцию к повышению (рис. 3, б). Указанная тенденция, как и в случае

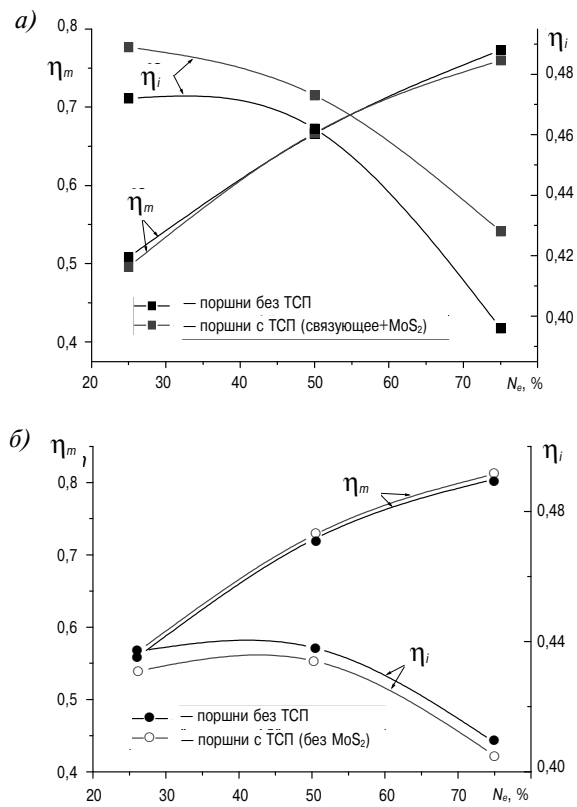


Рис. 3. Влияние ТСП, содержащего MoS_2 (а), и без MoS_2 (б) на зависимость индикаторного и механического КПД от мощности двигателя

с покрытием, содержащим MoS_2 , не может быть объяснена погрешностью измерений, так как экспериментально (рис. 4, б) показано снижение механических потерь при использовании ТСП без MoS_2 .

Существенная разница в значениях механических потерь, определенных методом прокручивания и методом индицирования на моторных режимах, объясняется тем, что при проворачивании коленчатого вала от постороннего источника энергии трение поршневых колец значительно ниже [7]. В общих механических потерях возрастает относительная доля трения юбки поршня о поверхность цилиндров.

При проворачивании вала дизеля от электродвигателя регистрировали также изменения давления p_c в конце такта сжатия в зависимости от температуры $T_{вмг}$ стенок цилиндров в районе ВМТ (рис. 5). При этом поддерживались постоянными температуры масла в картере и воздуха, подаваемого на обдув цилиндров и в цилиндры. Результаты показали (рис. 5), что влияние ТСП вследствие малости его толщины на снижение протечки газов из камеры сгорания в картер двигателя и, как следствие, на индикаторный КПД, исключается. Зарегистрированное изменение значений p_c при нанесении на поршни ТСП, содержащего MoS_2 , составило около 2 % (рис. 5, а), а при

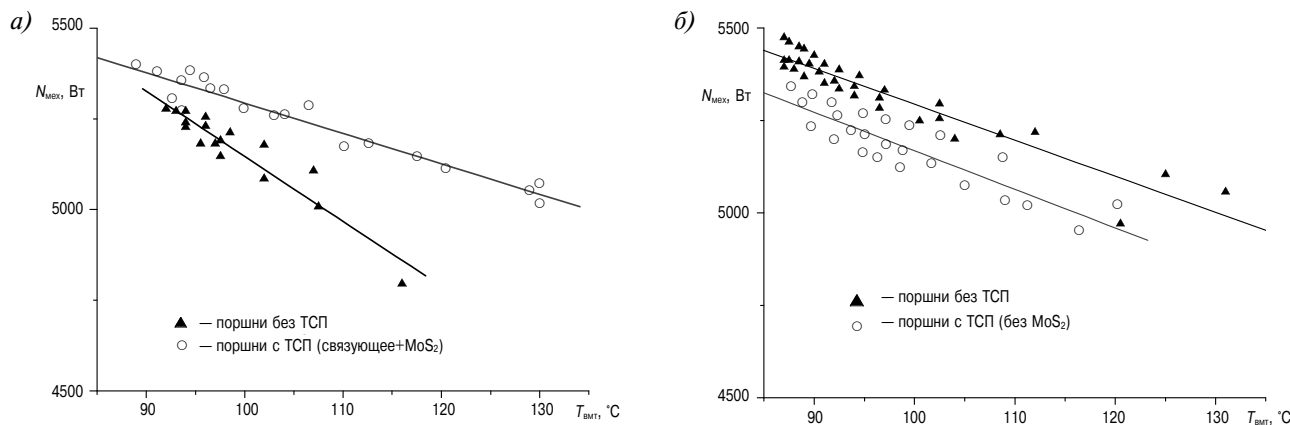


Рис. 4. Влияние ТСП, содержащего MoS_2 (а), и без MoS_2 (б) на мощность механических потерь, определенных методов прокручивания коленчатого вала дизеля

нанесении на поршни ТСП без MoS_2 — примерно 1 % (рис. 5, б). Такая разница не может быть признана значимой, так как находится в пределах погрешности измерений.

Таким образом, эксперименты с поршнями, на юбки которых было нанесено ТСП без MoS_2 , показали, что причина повышения индикаторного КПД в случае использования на поршнях ТСП с дисульфидом молибдена состоит не в теплоизолирующем действии связующего, а именно в присутствии в ТСП MoS_2 .

Отмеченное повышение эффективного КПД и снижение удельного расхода топлива дизеля, укомплектованного поршнями с покрытием, содержащим MoS_2 , подтверждается экспериментально зарегистрированным снижением температуры стенок цилиндров в зонах максимальной скорости движения поршня более, чем на 20°C и температуры отработавших газов примерно на 50°C (рис. 6, а). Снижение расхода топлива сопровождалось снижением выхода монооксида углерода почти в 3 раза (с 0,43 до 0,16 %) при незначительном росте оксидов азота (с 750 до 910 ppm). Снижение температуры стенок цилиндров, по-

видимому, привело к увеличению зазоров между поршнем и цилиндром и, как следствие, к увеличению удельного расхода масла с 2,83 (с поршнями без ТСП) до 3,44 г/(кВт·ч) при работе с поршнями с ТСП, содержащим MoS_2 .

После нанесения ТСП без дисульфида молибдена температура стенок цилиндров и отработавших газов практически не изменилась (рис. 6, б) по сравнению с использованием поршней без покрытия. Зазоры при этом остались практически прежними и, соответственно, расход моторного масла не изменился в пределах погрешности эксперимента: 1,35 для поршней без покрытия против 1,18 г/(кВт·ч) при использовании поршней с ТСП без дисульфида молибдена.

Вероятно, увеличение индикаторного КПД после нанесения на юбки поршней ТСП, содержащего MoS_2 , вызвано попаданием его частиц в масло, а затем вместе с ним — в камеру сгорания дизеля. Известно, что содержание микропримесей металла оказывает каталитическое действие на улучшение процесса горения топлива.

Гипотезу о попадании частиц MoS_2 из покрытия в моторное масло можно также подтвердить

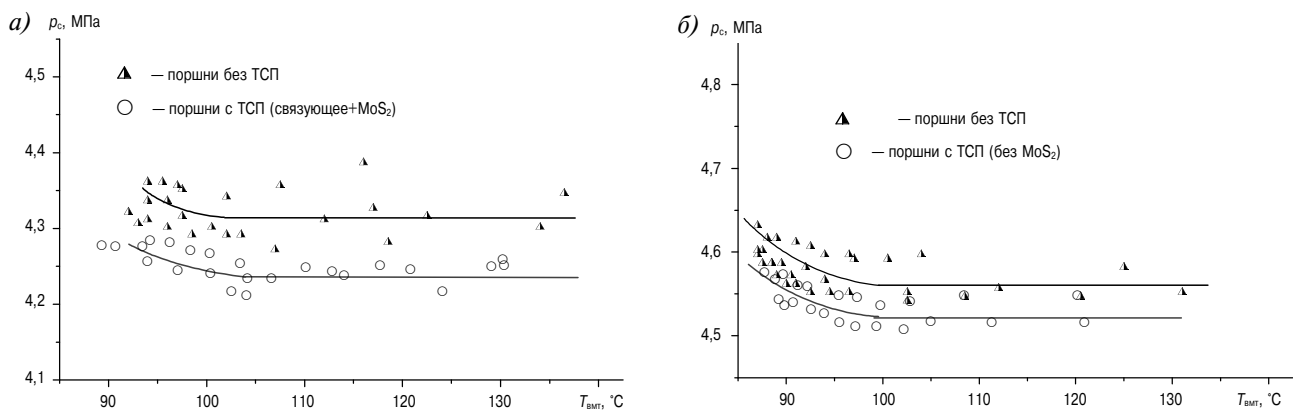


Рис. 5. Влияние ТСП, содержащего MoS_2 (а), и без MoS_2 (б) на давление в конце сжатия в зависимости от температуры стенки цилиндра

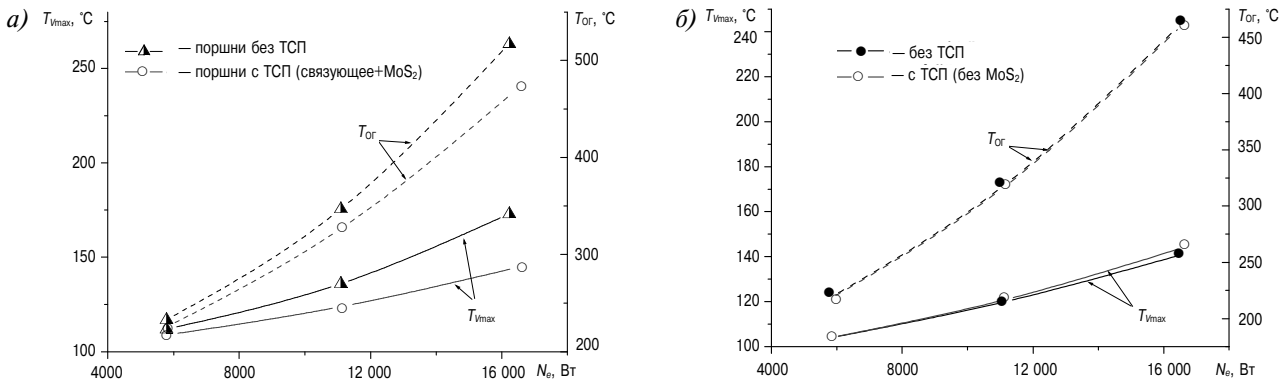


Рис. 6. Влияние ТСП, содержащего MoS_2 (а), и без MoS_2 (б) на зависимости температуры стенки цилиндров в районе максимальной скорости поршня и температуры отработавших газов от эффективной мощности двигателя

измерениями износа поршневых колец, так как при использовании поршней с покрытием, содержащим дисульфид молибдена, существенно (в среднем в 2 раза) снизился износ поршневых колец (рис. 7). То есть если частицы MoS_2 переносятся из ТСП на стенки цилиндров, снижая износ поршневых колец, то они также могут попадать и в камеру сгорания.

Подтверждением гипотезы о каталитическом действии частиц MoS_2 на процесс горения топлива могут послужить данные обработки индикаторных диаграмм при работе дизеля с поршнями без ТСП и с ТСП, содержащим MoS_2 . В таблице представлены результаты сравнения таких характеристик рабочего процесса, как максимальная скорость нарастания давления в период сгорания топлива и угол опережения воспламенения. Угол опережения воспламенения оценивали как угловой интервал между точкой, в которой линия горения отрывается от линии сжатия, и ВМТ, а максимальную скорость нарастания давления — по углу наклона касательной на участке повышения давления [8]. Среднее квадратическое отклонение найденных значений углов опережения не пре-

вышает 0,1; а максимальной скорости нарастания давления — 0,03. Как видно из таблицы, несмотря на снижение удельного расхода топлива (см. рис. 2, а) применение на поршнях ТСП, содержащего MoS_2 , привело к увеличению максимальной скорости нарастания давления. При этом, несмотря на более низкие температуры стенок цилиндров (см. рис. 6, а) задержка воспламенения по сравнению с поршнями без покрытия также сокращается. Все это подтверждает гипотезу о попадании частиц MoS_2 в камеру сгорания и

Характеристики рабочего процесса дизеля при использовании поршней без ТСП и с ТСП, содержащим дисульфид молибдена

Долевая мощность, %	Угол опережения воспламенения, град		Максимальная скорость нарастания давления, МПа/град	
	Поршни без ТСП	Поршни с ТСП	Поршни без ТСП	Поршни с ТСП
25	-2,3	-1,6	0,57	0,62
50	-3,2	-3,0	0,65	0,72
75	-3,6	-3,8	0,55	0,73

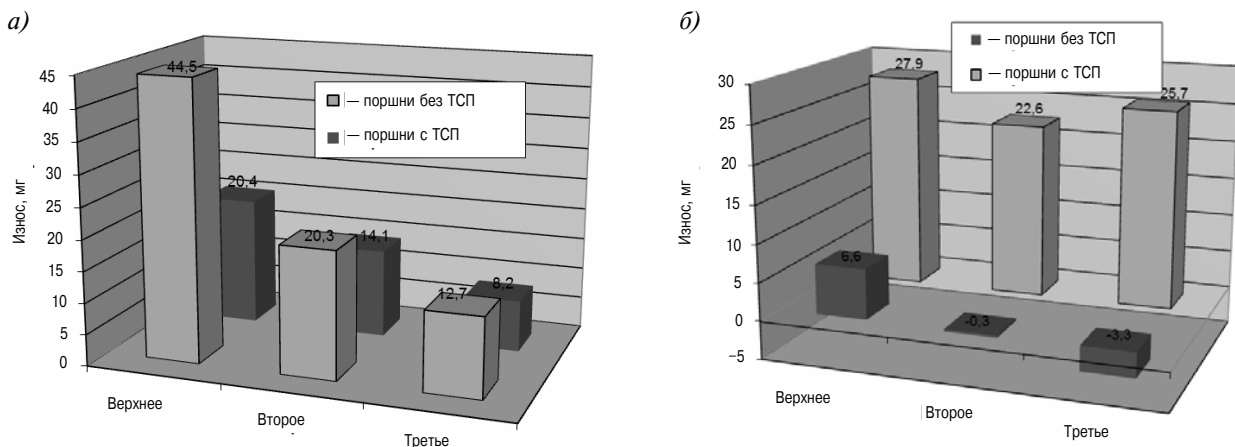


Рис. 7. Влияние ТСП, содержащего MoS_2 (а), и без MoS_2 (б) на износ поршневых колец (средний по кольцам двух поршней)

оказания каталитического действия на процесс горения топлива.

Выводы

1. ТСП, содержащее дисульфид молибдена, при нанесении на юбки поршней дизельного двигателя снижает удельный расход топлива, и тем больше, чем ближе режим работы дизеля к номинальному. Экономия топлива при нанесении ТСП, содержащего дисульфид молибдена, может превышать 5 % и происходит за счет увеличения индикаторного КПД.

2. Увеличение индикаторного КПД не может быть объяснено барьерным действием ТСП, содержащим дисульфид молибдена, на юбках

поршней, в результате которого снижается отвод тепла от поршня в стенки цилиндра, так как при испытании поршней с ТСП без MoS_2 увеличения индикаторного КПД не обнаружено.

3. Возможная причина увеличения индикаторного КПД при нанесении на юбки поршней ТСП, содержащего MoS_2 , — попадание частиц дисульфида молибдена с маслом в камеру сгорания и их влияние на процесс горения топлива.

4. Содержащийся в ТСП дисульфид молибдена не снижает механические потери в дизеле, при этом вопрос об эффективности противоизносного действия частиц MoS_2 , попадающих из ТСП в моторное масло, требует дальнейшего изучения.

Литература

1. *Матвеевский Р.М.* Твердые смазочные покрытия, назначения, методы нанесения // Твердые смазочные покрытия / под ред. Р. М. Матвеевского. — М.: Наука. — 1977. — С. 3–7.

2. *Вайнштейн В.Э., Трояновская Г.И.* Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. — М.: Машиностроение, 1968. — 180 с.

3. *Брейтуэйт Е.Р.* Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. — М.: Химия, 1967. — 320 с.

4. *Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М.* Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов. — СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. — 54 с.

5. *Цветков Ю.Н., Тарасов В.М.* Повышение эффективности дизелей нанесением на поршни твердого смазочного покрытия, содержащего дисульфид молибдена // Журнал университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК. 2010. — Вып. 1 (5). — С. 45–52.

6. *Цветков Ю.Н., Татулян А.А., Кузьмин В.Н., Крылов Д.А.* Дизельный стенд для испытания смазоч-

ных материалов // Журнал университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК. 2011. — Вып. 3 (11). — С. 57–66.

7. *Стефановский Б.С., Скобцев Е.А., Корси Е.К.* и др. Испытания двигателей внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 1972. — 368 с.

8. *Лебедев О.Н., Сомов В.А., Калашников С.А.* Двигатели внутреннего сгорания речных судов. — М.: Транспорт, 1990. — 328 с.

9. *Шагин В.В., Кузькин В.Г., Селянский Б.И., Гурин Г.И., Циулин В.А., Шамара В.Н.* Вопросы оценки ограничительных факторов при назначении норм предельных износов деталей судовых дизелей // Вопросы износостойкости и надежности судовых дизелей. — Л.: Транспорт, 1973. — С. 80–99.

10. *Стрельцов В.В., Попов В.Н., Карпенков В.Ф.* Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей. — М.: Колос, 1995. — 175 с.

11. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. — 472 с.



НОВОСТИ ГРУППЫ ГАЗ

«Группа ГАЗ» приступила к производству двигателей УМЗ-42164 экологического класса Евро-4

Ульяновский моторный завод «Группы ГАЗ» начал выпуск опытно-промышленной партии бензиновых (УМЗ-42164) и газово-бензиновых двигателей (УМЗ-421647) экологического класса Евро-4.

В ходе усовершенствования базового двигателя УМЗ-4216 в его конструкцию были внедрены следующие конструктивные изменения:

➤ электронное дроссельное устройство Delphi («электронная педаль газа»), позволяющее повысить комфорт управления автомобилем и снизить расход топлива;

➤ топливные форсунки нового поколения Delphi, обеспечивающие качественное смесеобразование и точную дозировку топлива для выполнения жестких экологических норм;

➤ распределительный вал с оптимизированными фазами, улучшающий экологические показатели и позволяющий повысить стабильность работы двигателя в режиме холостого хода;

➤ регулятор разрежения картерных газов с маслоотделителем, который минимизирует расход масла на угар и, соответственно, снижает выбросы углеводородов в атмосферу.

Все эти изменения позволили повысить надежность и увеличить ресурс двигателя.

Дальнейшее развитие продуктовой линейки двигателей УМЗ для автомобилей «ГАЗель» и «Соболь» будет направлено на повышение важнейших потребительских характеристик — экологичности и экономичности. При этом особый акцент будет сделан на развитии битопливных газово-бензиновых модификаций, которые с точки зрения эффективности эксплуатации являются оптимальными для легких коммерческих автомобилей.