

УДК 621.431.7

**РАСКЛИНИВАЮЩЕЕ ДАВЛЕНИЕ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ
ЦИЛИНДРОВОГО МАСЛА НА ЧУГУННЫХ ПОРШНЕВЫХ КОЛЬЦАХ
СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ****Д. И. Слободянюк¹, М. А. Колегаев², И. М. Слободянюк³**

В статье представлены результаты изучения расклинивающего давления в тонких масляных пленках нефтяного происхождения (ENERGOL CLO 50M) на поршневых кольцах из серого чугуна. Приведено сравнение расклинивающего давления в пленках цилиндрического масла на чугунных и стальных поверхностях.

Ключевые слова: *изотерма, давление, масляная пленка, анизотропия, эллипсометрия, цилиндропоршневая группа, дизель.*

Качество превращения энергии сгорания топлива в механическую работу в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) зависит от технического состояния деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), в том числе от состояния поршневого кольца. Опыт эксплуатации современных судовых малооборотных дизелей показал, что часто причиной внезапных отказов и возникновения аварийной ситуации является поломка поршневых колец. В работе [1] установлен один из механизмов поломки колец при прохождении продувочных окон втулок цилиндров. Аварии от поломки колец имеют самые тяжелые последствия, так как кроме потери ходового времени, могут привести к удорожанию ремонта двигателя за счет замены поршней, клапанов, втулок и др. Следовательно, для повышения надежности дизеля необходимо разработать методику идентификации технического состояния поршневого кольца при малых скоростях движения [2].

Известно [3-5], что при малых скоростях поршня в тонком пристенном слое цилиндрического масла, менее 300нм, вследствие структурирования молекул смазки, возникает расклинивающее давление, резко увеличивающееся при уменьшении толщины пленки. При движении кольца по ребрам втулок резко уменьшается слой смазки, при этом коэффициент трения равен $\mu=0,12\div 0,18$, что свидетельствует об отсутствии сухого трения.

Теоретическое исследование процессов движения кольца в районе продувочных окон, для случая разделения деталей пленкой с анизотропны-

¹ © Слободянюк Д.И., аспирант, ОНМА.

² © Колегаев М.А., к.т.н., проф, ОНМА.

³ © Слободянюк И.М., к.т.н., доц., ОНМА.

ми свойствами не представляется возможным без экспериментально полученного значения расклинивающего давления в этой пленке [6].

Таким образом, отсутствие исследований свойств тонких пленок смазывающих материалов на чугунных поверхностях, из которых изготовлены и кольцо и втулка цилиндра, является сдерживающим фактором совершенствования надежности СДВС путем предупреждения внезапных отказов от поломок колец и корректировки технического обслуживания, потому такие исследования являются актуальными.

Цель работы – экспериментальное исследование расклинивающего давления в тонких масляных пленках нефтяного происхождения на поверхности поршневых колец судовых малооборотных двигателей.

Исследования проводились на типичном для СДВС цилиндровом масле фирмы ENERGOLO CLO 50M на материале поршневого кольца взятого с главного двигателя MAN B&W 7S46MC-C. Металлографический анализ показал, что кольцо состоит из серого чугуна, основа которого имеет феррито-перлитную структуру. Твердость кольца HB2770. Чугунная поверхность шлифовалась до величины $R_a 0,4 \div 0,6$, что соответствует чистоте поверхности кольца и ребер втулки цилиндра после приработки.

Авторами изучены [5, 7] изотермы расклинивающего давления в тонком смазочном слое материалов нефтяного происхождения на некоторых стальных поверхностях, используемых в дизелестроении. Показано, что зарождение пленок происходит при разных толщинах и давлениях в пленке, толщина ее и величина максимального расклинивающего давления зависят от химического состава металла.

Исследования главных характеристик пленок – изотерм расклинивающего давления, проводились на экспериментальной эллипсометрической установке [7], схема которой показана на рис. 1.

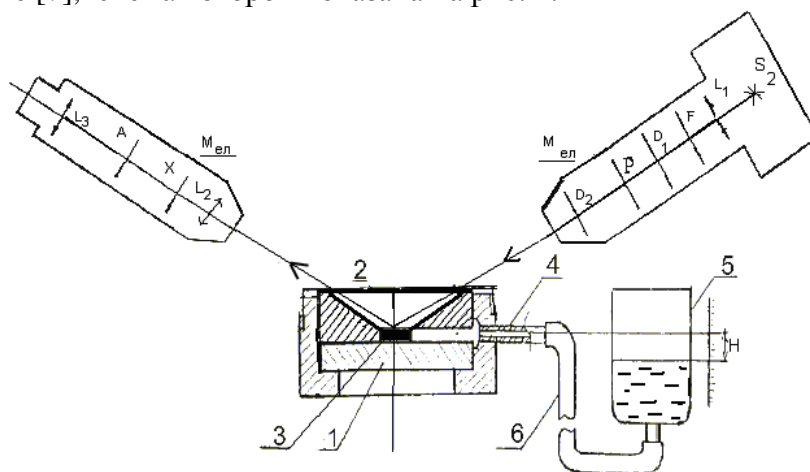


Рис.1. Схема установки исследования изотерм расклинивающего давления в тонких пленках масла на металлических поверхностях.

Ячейка, в которой изучалась пленка, была выполнена следующим образом. На полированный образец чугуна 1 устанавливался стальной конус 2, с отверстием диаметром 1 мм, в котором формировалась пленка масла 3. В подложке изготовлялась канавка от пленки до штуцера 4, который соединялся шлангом 6 с напорным сосудом 5, в котором находилось исследуемое цилиндрическое масло.

Из теории Гиббса следует, что на границе любых смежных фаз существуют переходные слои, физико-химические свойства которых отличны от свойств объемной фазы. В случае перекрытия межфазных слоев [8, 9] гидростатическое давление в тонкой прослойке отличается от давления той объемной фазы, частью которой является пленка, то есть в тонкой пленке не выполняется закон Паскаля. Дополнительное давление, обеспечивающее термодинамическое равновесие пленки, было названо расклинивающим. Оно может быть как положительным, так и отрицательным. Зависимость $P(h)$ – изотерма расклинивающего давления является термодинамической характеристикой тонкой пленки жидкости.

Для измерения расклинивающего давления необходимо обеспечить, с помощью внешнего давления, механическое равновесие смачивающей пленки. Если система находится в термодинамическом равновесии и расклинивающее давление положительно, то его мерой будет пониженное (отрицательное) давление, созданное в сопряженной объемной фазе, путем опускания напорного сосуда. И наоборот, в случае отрицательного расклинивающего давления его мерой будет избыточное гидростатическое давление. В обоих случаях расклинивающее давление $P(h)$ будет равно разности между давлением P_1 на поверхности пленки и давлением P_0 в объемной фазе [9-11].

$$P = \rho g(H_0 - H_1). \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность масла. Величины H_1 и H_0 определялись с помощью микрометрического устройства соответственно, с точностью $\Delta H = \pm 0,1$ мм, что приводило к ошибке расклинивающего давления $\Delta P = \pm 1$ Па.

Время установления равновесной толщины для смачивающих пленок масла при диаметре отверстия 1 мм, определялось экспериментально и составляло 30÷40 минут.

Положение нулевого уровня H_0 в напорном сосуде, соответствующее моменту образования пленки из объемной фазы, определялось по состоянию интерференционных линий от пленки и устанавливалось для точки, в которой движение схождения и расхождения интерференционной картины прекращалось.

С целью уменьшения вибраций, что крайне важно при формировании равновесных смачивающих пленок, эллипсометрический микроскоп был установлен на три стальных диска (масса каждого 20 кг), которые рас-

полагались на массивной бетонной плите (200 x 60 x 5 см). Резиновые прокладки между опорными консолями, вмонтированными в стену, и бетонной плитой обеспечивали высокий коэффициент затухания всей системы и, как следствие, неизменность диаметра смачивающей пленки.

Толщина пленки h измерялась с помощью эллипсометрического микроскопа - $M_{эл}$. Методика эллипсометрических измерений толщин смачивающих неполярных пленок масла на проводящих металлических поверхностях разработана авторами и подробно описана в работе [7]. Эллипс поляризации отраженного света описывается эллипсометрическими углами Ψ и Δ , причем $tg \Psi$ - равен отношению изменению амплитуд p и s - компонент, а Δ - относительной разности фаз между ними. В ходе эксперимента определялись азимуты анализатора A_0' , A_0'' и поляризатора P_0' , P_0'' гашения света.

Для расчета толщины слоя использовалось основное уравнение эллипсометрии – уравнение Друде [10], устанавливающего связь между экспериментальными параметрами Ψ и Δ и оптическими характеристиками отражающего образца, определяемыми обобщенными коэффициентами Френеля R_p и R_s .

$$tg \Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}, \quad (2)$$

где Ψ – определяется отношением Френелевских коэффициентов отражения для P и S поляризации;

Δ – сдвиг фаз между P и S компонентами возникающий при отражении;

R_p, R_s – обобщенные коэффициенты Френеля для отраженного света.

Для рассматриваемого случая однородного изотропного слоя выражение (2) принимает вид [Горшков] [10]:

$$tg \Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_{12p} + R_{23p} e^{-2i\delta}}{1 + R_{12p} R_{23p} e^{-2i\delta}} \cdot \frac{1 + R_{12s} R_{23s} e^{-2i\delta}}{R_{12s} + R_{23s} e^{-2i\delta}}. \quad (3)$$

Здесь $\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 d \sin \varphi_2$, где d – искомая толщина слоя, а

$R_{12p}, R_{12s}, R_{23p}, R_{23s}$ определяются выражениями соответственно:

$$\begin{aligned}
 R_{12p} &= \frac{n_2 \cos \varphi_1 - \cos \varphi_2}{n_2 \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2} & R_{23p} &= \frac{n_3 \cos \varphi_2 - n_2 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_3} \\
 R_{12s} &= \frac{\cos \varphi_1 - n_2 \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1 + n_2 \cos \varphi_2} & R_{23s} &= \frac{n_2 \cos \varphi_2 - n_3 \cos \varphi_3}{n_2 \cos \varphi_2 + n_3 \cos \varphi_3}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Задача осложняется необходимостью учета эффектов ослабления электромагнитной волны в металлической подложке. В общем случае уравнение (3) сформулировано для неоднородных волн и может решаться путем введения комплексных показателей преломления, учитывающих эффекты затухания. В рассматриваемом случае $n_3 \Rightarrow N_3 = n_3 - ik_3$, где n и k – коэффициенты преломления и поглощения подложки. Для чугуна были приняты следующие значения: $n = 3,9$, $k = 6,96$.

Таким образом, уравнение (3) с учетом (4) и вышесказанного, является комплексным выражением и, следовательно, поиск толщины слоя означает решение системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{Re} \left(\operatorname{tg} \psi \cdot e^{i\Delta} - \frac{(R_{12p} + R_{23p} e^{-2i\delta})(1 + R_{12s} R_{23s} e^{-2i\delta})}{(1 + R_{12p} R_{23p} e^{-2i\delta})(R_{12s} + R_{23s} e^{-2i\delta})} \right) &= 0 \\
 \operatorname{Im} \left(\operatorname{tg} \psi \cdot e^{i\Delta} - \frac{(R_{12p} + R_{23p} e^{-2i\delta})(1 + R_{12s} R_{23s} e^{-2i\delta})}{(1 + R_{12p} R_{23p} e^{-2i\delta})(R_{12s} + R_{23s} e^{-2i\delta})} \right) &= 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

Экспериментальная изотерма расклинивающего давления пленки масла на чугунной поверхности шероховатостью ($R_a 0,4$), полученная при температуре 295°K представлена на рис. 2. Изотерма имеет вид близкий к экспоненциальному, что соответствует работам Б.В.Дерягина и Ю.М. Поповского [4].

$$P = \frac{A}{h^3}, \tag{6}$$

где A – постоянная Гамакера.

Изотермы, в пленках масла на чугуне, соответствуют области положительных значений расклинивающего давления $P_s > 0$, носят падающий характер. Из этого следует, что расклинивающее давление в тонкой пленке может, в режиме саморегулирования, автоматически уравнивать нормальную нагрузку воспринимающую парой кольцо – втулка.

Максимальное значение расклинивающего давления определялось из графика построенного в полулогарифмических координатах зависимости $\ln P(h)$ от толщины пленки h . Для чугуна максимальная величина расклинивающего давления равна $\Pi(h) = 140000 \text{ Па}$.

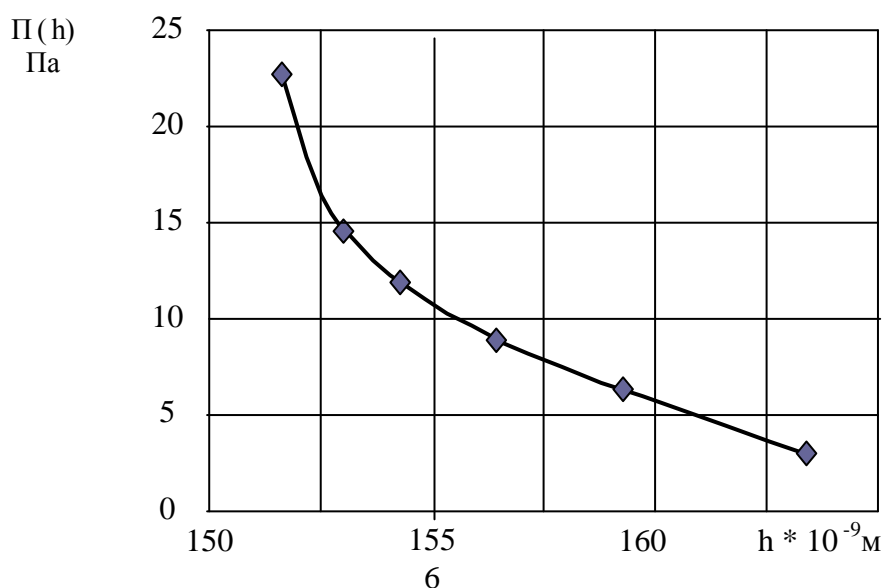


Рис. 2. Изменение расклинивающего давления в тонкой пленке смазки ENERGOL CLO 50M на чугуном поршневом кольце в зависимости от толщины пленки

Отличительной особенностью масляных пленок с анизотропными свойствами на чугуне является малая величина изменения толщины пленки от момента ее зарождения до минимальной, при которой давление в пленке начинает резко возрастать. Для пленок на чугуне эта толщина равна $10 \div 12$ нм. Если сравнивать с толщиной пленок на сталях (рис. 3) [6, 7], то видно, что на стали 35 XMA, из которой изготовлены головки поршней MAN и B&W, она равна 126 нм, что на порядок больше чем у чугуна. Для стали 35 XMA максимальная величина расклинивающего давления равна $\Pi(h)=2490$ Па. На стали 45 максимальная величина расклинивающего давления равна $\Pi(h)=40000$ Па.

Значение расклинивающего давления состоит из суммы молекулярной составляющей $\Pi_m(h)$, действующей при малых толщинах пленки и структурной $\Pi_s(h)$:

$$\Pi(h) = \Pi_m(h) + \Pi_s(h)..$$

Полученные результаты показывают значительное влияние химического состава подложки на изменение степени ориентационной упорядоченности молекул с изменением толщины пленки, которая определяет величину структурной составляющей $\Pi_s(h)$ расклинивающего давления. Очевидно, такое различие в полученных значениях $\Pi(h)$ можно объяснить разным вкладом молекулярной составляющей расклинивающего давления, который имеет существенное значение при малых толщинах пленок. Ранее эффект

влияния молекулярной составляющей на величину расклинивающего давления установлен для пленок полярных жидкостей на диэлектриках [10, 11].

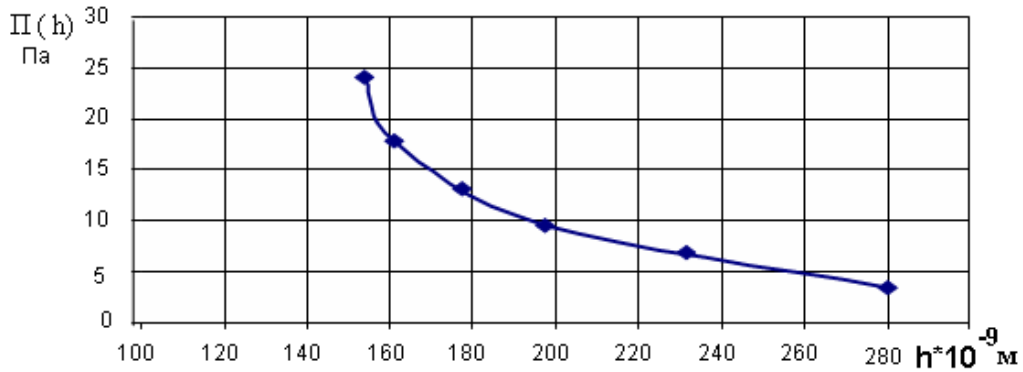
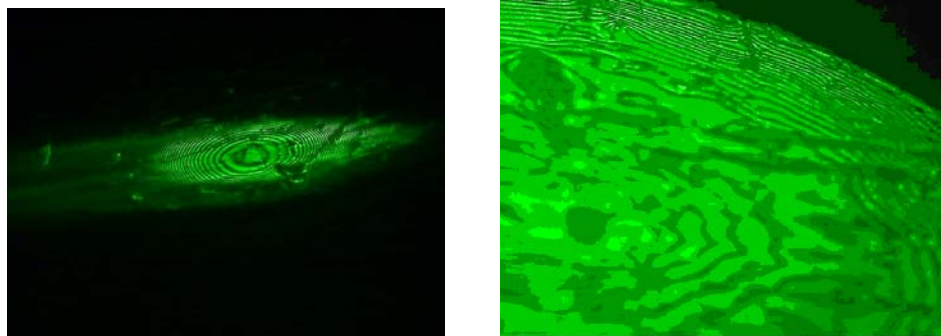


Рис. 3. Зависимость расклинивающего давления в пленке масле ENEKOL GLO 50M от толщины на стали 35 XMA

Анализ полученных значений расклинивающего давления показывает, что представление $\Pi s(h)$ в виде экспоненты не всегда является корректным, а действительная зависимость структурной составляющей от толщины пленки является более сложной.

На рис.4 показаны микрофотографии тонкой пленки масла на чугунной поверхности. Пленка не является плоской. Интерференционную картину формируют графитовые включения, что хорошо видно на рис. 4, б.



а)

б)

Рис. 4. Микрофотографии пленки масла на чугуне: зарождение (а), пленка минимальной толщины (б)

Выводы

1. Впервые экспериментально получена изотерма расклинивающего давления в пленках цилиндрического масла на чугунах, соответствующая области положительных давлений $P_s > 0$, т.е. в тонкой пленке цилиндрической смазки возникает сила, направленная в противоположную сторону давления кольца на перемычку окна втулки цилиндра.
2. Установлено, что изотермы расклинивающего давления в пленках цилиндрического масла на чугунных и стальных поверхностях носят падающий характер, чем обеспечивается процесс саморегулирования давления поршневого кольца на втулку – каждому новому значению давления устанавливается новая равновесная толщина пленки. Процесс саморегулирования происходит автоматически и не требует вмешательства оператора.
3. Сравнение полученных экспериментальных изотерм расклинивающего давления в пленках масла на стальных поверхностях и на чугунах показало, следующее:

➤ зарождение пленок на сталях и чугунах происходит при разных толщинах и давлениях в пленке. На сталях зарождение пленки происходит в интервале $240 \div 280$ нм, а на сером чугуне при значительно меньшей толщине, равной $163 \div 165$ нм;

➤ толщина пленок от начала образования пленки до момента резкого увеличения давления для сталей составляет 130 нм, что на порядок больше чем на чугунах, составляющий всего $10 \div 12$ нм;

➤ минимальная толщина пленок на чугунах, при которой расклинивающее давление имеет максимальное значение лежит в интервале 155–160 нм;

➤ установлено максимальное расклинивающее давление, возникающее в пленке цилиндрической смазки на чугунах равное $P_s = 0,14$ МПа.

Дальнейшее развитие теоретического исследования процессов движения поршневых колец при наличии тонких пленок смазки с анизотропными свойствами, используя полученные изотермы расклинивающего давления на чугунах, позволит повысить надежность судовых малооборотных дизелей путем предупреждения внезапных отказов, возникающих при поломке колец.

Таким образом, управление силами в смазочных слоях с анизотропными свойствами, обусловленными расклинивающим давлением позволяет компенсировать нормальную нагрузку на зону трения, в результате чего можно уменьшить энергетические потери и величину изнашивания сопряженных поверхностей, а также предупредить поломку поршневых колец при малых скоростях движения поршня, предупредив аварийную ситуацию на судне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ханмамедов С.А., Слободянюк Д. И. Совершенствование методов идентификации технического состояния поршневых колец судовых МОД // Судовые энергетические установки: Науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2011. – № 26. – С. 126-133.
2. Слободянюк Д.И. Совершенствование методики идентификации состояния поршневых колец МОД на основе экспериментального исследования частоты акустического сигнала // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – Одесса: ИнтерПринт, 1012. – №3. – С. 68-75.
3. Дерягин Б.В., Поповский Ю.М. Жидкокристаллическое состояние граничных слоев некоторых полярных жидкостей // Коллоид, журн. -1982. -Т. 44. -№5. -С. 863-870.
4. Ханмамедов С.А. Совершенствование функциональных свойств систем смазывания судовых энергетических установок: Дисс. докт. техн. наук, – Николаев; 1990. –672 с.
5. Слободянюк Д.И., Ханмамедов С.А. Экспериментальные изотермы расклинивающего давления в пленках цилиндрического масла и их применение для повышения надежности судового дизеля // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – Одесса: ДиолПринт, 2011. – № 2. – С. 136-147.
6. Слободянюк Д.И., Ханмамедов С.А, Шакун К.С. Расчет частоты импульсов акустического сигнала от сопряжения «кольцо-втулка» ЦПГ МОД с учетом расклинивающего давления в тонких пленках смазки // Судовые энергетические установки: Научн. техн. сб. –Одесса: ОНМА, – 2012. – №28. – С.39-48.
7. Ханмамедов С.А., Слободянюк Д.И., Горюк А.А., Шакун К.С. Изотермы расклинивающего давления в структурированной пленке цилиндрического масла судового дизеля // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – Одесса: ДиолПринт, 2011. – №1. – С. 90-101.
8. Дерягин Б.В., Кусаков М.М. Свойства тонких слоев жидкостей // Изв.АН СССР. Сер.хим. – 1936. – №5. – С. 741-753.
9. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. К вопросу об определении понятия расклинивающего давления // Коллоид. журн. – 1976. – Т. 38. – №3. – С.438-448.
10. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. – М.: Наука, 1984 – 157 с.
11. Горюк А.А. Исследование структурной составляющей расклинивающего давления в смачивающих пленках нитробензола: Дисс. канд. физ. мат наук. – Одесса, 1988. – 122 с.

Рукопись поступила в редакцию 25.04.2013 г.