

УДК 621.431.7

Д. И. Слободянюк,
канд. техн. наук, профессор
Одесская национальная морская академия (Украина);

М. А. Колегаев,
канд. техн. наук, профессор,
Одесская национальная морская академия (Украина);

А. А. Горюк,
канд. техн. наук, доцент,
Одесская национальная морская академия (Украина)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗОТЕРМЫ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ В ПЛЕНКАХ ЦИЛИНДРОВОГО МАСЛА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

EXPERIMENTAL ISOTHERMS OF THE DISJOINING PRESSURE IN THE CYLINDER OIL FILMS OF MARINE DIESEL ENGINE

Представлены результаты изучения расклинивающего давления в тонких масляных пленках цилиндрического масла нефтяного происхождения (ENERGOL CLO 50M) судового малооборотного дизеля на стали и поршневом кольце из серого чугуна.

Here are presented the results of the study of the disjoining pressure in thin cylinder oil films of petroleum origin (ENERGOL CLO 50M) marine low-speed diesel engine, on steel and piston ring made of grey cast iron.

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

Key words: isotherm, pressure, oil film, anisotropy, elipsometriya, cylinder and piston group, diesel.

ПОВЫШЕНИЕ эффективности эксплуатации современных судовых малооборотных дизелей (МОД) требует совершенствования управления процессами трения сопряженных деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и защиты от аварийных ситуаций. Рост удельных мощностей в двигателестроении снижает долговечность деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля. Изнашивание и поломка компрессионных колец малооборотных дизелей форсированного ряда является наиболее частой причиной их функционального отказа, однако причины этого явления до настоящего времени недостаточно изучены. В работе приведены данные, свидетельствующие о том, что поломка поршневых колец, в частности, может происходить в момент прохождения продувочных окон в результате нарушения смазки [1, с. 126–133].

Анализ литературы показал, что на современных судах проводится мониторинг состояния и выполнения функций отдельными ответственными деталями ЦПГ, основанный на методах виброакустической диагностики [2; 3]. Однако в применяемых системах мониторинга состояния поршневых колец нет информации о процессах взаимодействия сопряжения «кольцо–втулка» при малых скоростях движения. Особенностью этого процесса является то, что в момент прохождения продувочных окон режим смазки не является гидродинамическим. В тонком смазочном слое за счет структурирования молекул пристенных слоев возникает расклинивающее давление, препятствующее возникновению адгезионного контакта между поршневым кольцом и перемычками окон втулки [4, с. 741–753; 5, с. 438–448; 6, с. 90–101].

Теоретическое исследование процессов движения кольца в районе продувочных окон для случая разделения деталей пленкой с анизотропными свойствами, в частности расчет частоты акустических колебаний при диагностировании технического состояния поршневого кольца, не

представляется возможным без экспериментально полученного значения расклинивающего давления в этой пленке [7, с. 58–67].

Таким образом, отсутствие исследований свойств тонких пленок смазывающих материалов является сдерживающим фактором совершенствования надежности судовых МОД путем корректировки технического обслуживания в зависимости от смазки, а также предупреждения внезапных отказов от поломок колец по результатам виброакустического диагностирования, поэтому данные исследования являются актуальными.

Цель работы — экспериментальное исследование расклинивающего давления в тонких масляных пленках нефтяного происхождения на поверхности стальных и чугунных материалов, используемых в дизелестроении.

Исследования проводились на типичном для СДВС цилиндровом масле фирмы “ENERGOL” CLO 50M на материале поршневого кольца, взятого с главного двигателя MAN B&W 7S46MC-C и стали ШХ15.

Металлографический анализ показал, что кольцо состоит из серого чугуна, основа которого имеет ферритоперлитную структуру. Твердость кольца HB2770. Чугунная поверхность шлифовалась до величины $R_a 0,4 \pm 0,6$, что соответствует чистоте поверхности кольца и ребер.

Исследования главных характеристик пленок-изотерм расклинивающего давления проводились на экспериментальной эллипсометрической установке, схема которой показана на рис. 1 [6].

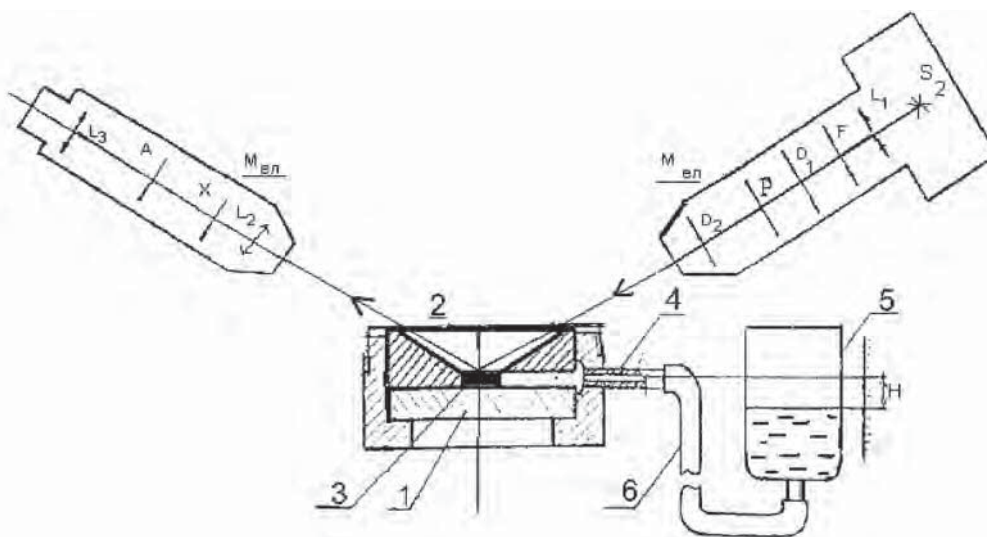


Рис. 1. Схема установки исследования изотерм расклинивающего давления в тонких пленках масла на металлических поверхностях

Ячейка, в которой изучалась пленка, была выполнена следующим образом. На полированный образец чугуна или стали 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 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 $\Pi(h)$ — изотерма расклинивающего давления, является термодинамической характеристикой тонкой пленки жидкости [4; 5].

Для измерения расклинивающего давления с помощью внешнего давления необходимо обеспечить 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 обоих случаях расклинивающее давление $\Pi(h)$ будет равно разности между давлением P_1 на поверхности и давлением P_0 в объемной фазе [6; 8].

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

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.

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.

Толщина пленки h измерялась с помощью эллипсометрического микроскопа — $M_{3д}$. Методика эллипсометрических измерений толщин смачивающих неполярных пленок масла на проводящих металлических поверхностях разработана авторами и подробно описана в работе [6]. Эллипс поляризации отраженного света описывается эллипсометрическими углами Ψ и Δ , причем $\text{tg } \Psi$ 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, устанавливающее связь между экспериментальными параметрами Ψ и Δ и оптическими характеристиками отражающего образца, определяемыми обобщенными коэффициентами Френеля R_p и R_s [4]:

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

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 изотропного слоя выражение (2) принимает вид [Горшков] [5]:

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

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:

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

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 $n_3 \Rightarrow N_3 = n_3 - i \kappa_3$, где n и κ — коэффициенты преломления и поглощения подложки. Для чугуна и стали были приняты следующие значения: $n = 3,9$, $\kappa = 6,96$.

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

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

Экспериментальные изотермы расклинивающего давления пленки масла на чугунной поверхности и стали ШХ15 шероховатостью ($R_a 0,4$), полученные при температуре 295 К, представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из рисунков, изотермы, полученные на стальных и чугунных поверхностях в пленках масла, имеют вид, близкий к экспоненциальному, что соответствует работам Б. В. Дерягина и Ю. М. Поповского [4].

$$P = \frac{A}{h^3}, \quad (6)$$

где A — постоянная Гамакера.

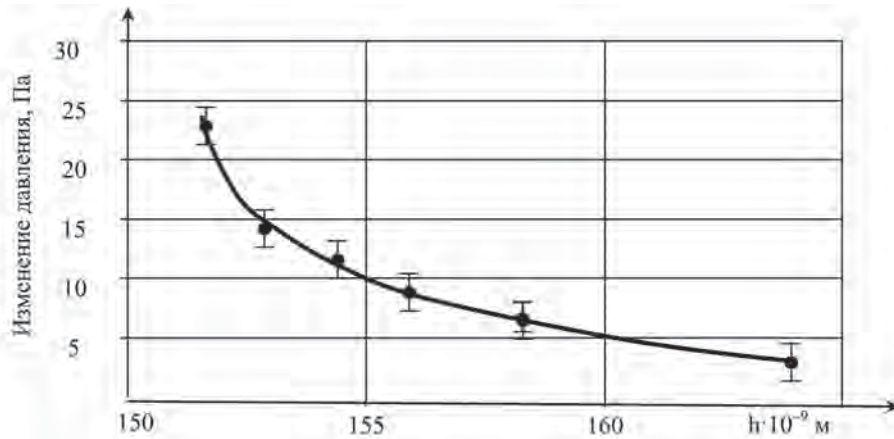


Рис. 2. Изменение расклинивающего давления в тонкой пленке смазки ENERGOL CLO 50M на чугунном поршневом кольце в зависимости от толщины пленки

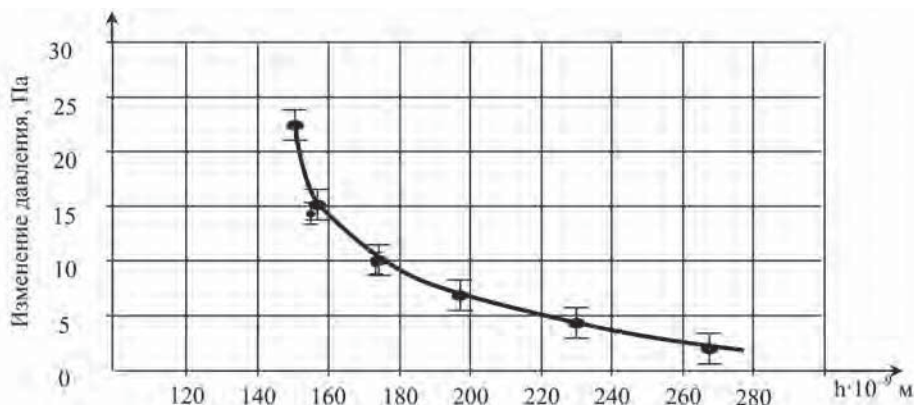


Рис. 3. Зависимость расклинивающего давления в масле ENERGOL CLO 50M от толщины пленки на стали ШХ15

Полученные изотермы в пленках масла на чугуне и стали соответствуют области положительных значений расклинивающего давления $\Pi_s > 0$ и носят падающий характер. Из этого следует, что расклинивающее давление в тонкой пленке может в режиме саморегулирования автоматически уравнивать нормальную нагрузку, воспринимаемую 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 $\Pi(h) = 0,14$ МПа.

Сравнение полученных экспериментальных изотерм расклинивающего давления в пленках масла на стальных поверхностях и на чугуне показало следующее:

— зарождение пленок происходит при разных толщинах и давлениях в пленке. Пленка из объемной фазы на стали ШХ15 зарождается при толщине 270 нм при давлении $P = 8$ Па. При уменьшении толщины пленки до 200 нм давление возрастает незначительно. На сером чугуне пленка зарождается 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 чугуне ($10 \div 12$ нм);

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

— установлено максимальное расклинивающее давление, возникающее в пленке цилиндрической смазки на чугуне, равное $\Pi_s = 0,14$ МПа;

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 [4; 7].

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.

Анализ микрофотографий тонкой пленки масла на чугунной поверхности (рис. 4) показывает, что пленка не является плоской. Интерференционную картину на чугуне формируют графитовые включения, что хорошо видно на рис. 4, б.

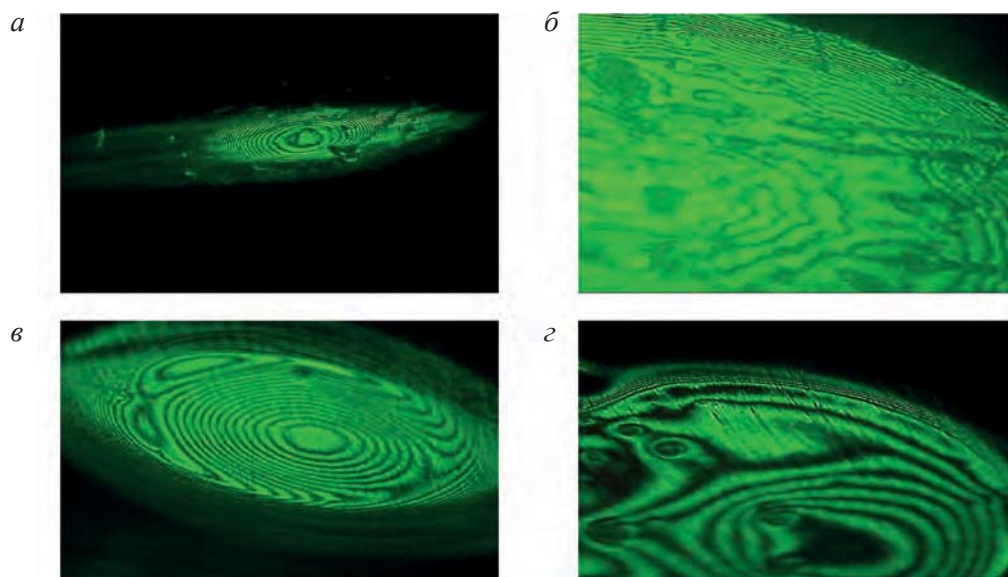


Рис. 4. Микрофотографии пленки масла на чугуне: а — зарождение пленки; б — пленка минимальной толщины; в — зарождение пленки на стали ШХ15; г — пленка минимальной толщины на стали ШХ15

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.

Выводы

1. Впервые экспериментально получены изотермы расклинивающего давления в пленках цилиндрического масла на чугунах и стали, которые соответствуют области положительных давлений $P_s > 0$, то есть 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. Анализ экспериментальных изотерм расклинивающего давления в пленках масла на стальных поверхностях и на чугунах показал следующее:

— зарождение пленок происходит при разных толщинах и давлениях в пленке. Пленка из объемной фазы на стали ШХ15 зарождается при толщине 270 нм при давлении $P = 8$ Па. При уменьшении толщины пленки до 200 нм давление возрастает незначительно. На сером чугуне пленка зарождается при значительно меньшей толщине, равной 163÷165 нм.

— толщина пленок от начала ее образования до момента резкого увеличения давления для сталей составляет 130 нм, что на порядок больше, чем на чугуне (10÷12 нм);

— минимальная толщина пленок на чугуне, при которой расклинивающее давление имеет максимальное значение, лежит в интервале 155–160 нм, для стали — в интервале 150–155 нм;

— установлено максимальное расклинивающее давление, возникающее в пленке цилиндрической смазки на чугуне, равное $P_s = 0,14$ МПа;

Практическая значимость исследований заключается в том, что полученные результаты используются авторами для разработки методики идентификации технического состояния поршневого кольца методом виброакустической диагностики с целью совершенствования технического обслуживания и предупреждения внезапных отказов, возникающих при поломке колец.

Дальнейшее развитие теоретического исследования процессов движения поршневых колец при наличии тонких пленок смазки с анизотропными свойствами, используя полученные данные расклинивающего давления на чугунах и стали, позволит повысить надежность судовых малооборотных дизелей путем корректировки технического обслуживания в зависимости от смазки, а также предупреждения внезапных отказов, возникающих при поломке колец.

Список литературы

1. Ханмамедов С. А. Совершенствование методов идентификации технического состояния поршневых колец судовых МОД / С. А. Ханмамедов, Д. И. Слободянюк // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. — Одесса: ОНМА, 2011. — № 26.

2. Hellingman G. J. Shipboard investigations with Selected Fuels of Tomorrow / G. J. Hellingman, S. Barrow // CIMAC. — Helsinki, 1981.

3. Neate R. J. SIPWA-A Shipowner's Point of View / R. J. Neate, S. Barrow. — New Sulzer Diesel Ltd., 1990. — Dec.

4. *Дерягин Б. В.* Свойства тонких слоев жидкостей / Б. В., Дерягин М. М. Кусков // Изв. АН СССР. Сер. «Химия». — 1936. — № 5.
5. *Дерягин Б. В.* К вопросу об определении понятия расклинивающего давления / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев // Коллоидный журнал. — 1976. — Т. 38, № 3.
6. Изотермы расклинивающего давления в структурированной пленке цилиндрического масла судового дизеля / С. А. Ханмамедов [и др.] // Проблемы техники. — 2011. — № 1.
7. *Слободянюк Д. И.* Расчет частоты импульсов акустического сигнала от сопряжения «кольцо–штулка» ЦПГ МОД с учетом расклинивающего давления в тонких пленках смазки / Д. И. Слободянюк, С. А. Ханмамедов, К. С. Шакун // Судовые энергетические установки: сб. науч. тр. — Одесса: ОНМА, 2011. — № 29.
8. *Горюк А. А.* Исследование структурной составляющей расклинивающего давления в смазывающих пленках нитробензола: дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. А. Горюк. — Одесса, 1988. — С. 122.