УДК 621.78

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ АДГЕЗИОННОЙ СВЯЗИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОРШНЕВЫХ КОЛЬЦАХ ДВС С УЧЕТОМ ИХ ТЕПЛОВОГО И ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

[1]Кравченко И.Н., [2]Бобряшов Е.М., [3]Пузряков А.Ф.

[1]ФГБВОУ ВПО «Военно-технический университет», Балашиха;

[2]ФКП НИИ «Геодезия» Министерства промышленности и торговли, Красноармейск;

[3]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Балашиха,

e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Эффективное использование современных машин в значительной степени зависит от их технического состояния. Поскольку экономичность и безопасность работы техники зависит от рабочего состояния двигателей внутреннего сгорания, то к показателям надёжности их работы предъявляются повышенные требования. Главную роль в обеспечении теплоотвода и уплотнения играют рабочие поверхности контакта поршневых колец, одновременно и с цилиндровой втулкой, и с нижней частью поршневой канавки. При этом решающее значение приобретают выбор материала и разработка технологии нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность поршневого кольца. Для оценки возникающих напряжений предложена расчетная модель теплового и термонапряженного состояния поперечного сечения поршневых колец с плазменным покрытием, под действием внешних нагрузок и повышенной температуры, моделирующих реальные условия их работы в двигателе.

Ключевые слова: адгезионный контакт, двигатель внутреннего сгорания, касательные напряжения, коэффициент теплового расширения, модель упругого тела, плазменные покрытия, поршневые кольца, термонапряженное состояние, цилиндропоршневая группа

ENSURING THE RELIABILITY OF THE ADHESIVE BOND OF PLASMA COATINGS ON THE PISTON RINGS ENGINES BASED ON THEIR THERMAL AND THERMAL STRESS STATE

[1]Kravchenko I.N., [2]Bobryashov E.M., [3]Puzryakov A.F.

[1]FSEI HME «Military-Technical University», Balashikha;

[2]Scientific-Research Institute «Geodesy» of the Ministry of Industry and Trade, Krasnoarmeysk;

[3]Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Balashikha,

e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Efficient use of modern machinery is largely dependent on their technical condition. Since the efficiency and safety of the technique depends on the operating conditions of internal combustion engines, then the indicators' reliability are increased requirements. The main role in the heat seal and the contact surface play an operating piston rings simultaneously with the cylinder sleeve and the piston groove bottom part. At the same time crucial to the choice of material and the development of technology wear-resistant coatings on the working surface of the piston ring. To evaluate the stresses proposed theoretical model of thermal and thermal stress state of the cross-section of piston rings with plasma coating, under the action of external loads and elevated temperature, simulating the actual conditions of their work in the engine.

Keywords: adhesive contact, engine, shear stresses, thermal expansion coefficient, model of an elastic body, plasma coatings, piston rings, thermal stress state, cylinder group

Повышение удельной мощности и экономичности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) характеризуется повышением температур в камере сгорания и деталях цилиндропоршневой группы (ЦПГ). При этом надежность работы ДВС во многом определяется тепловым и термонапряженным состоянием, определение которого целесообразно расчетным путем [5, 7].

Опыт эксплуатации ДВС показывает, что их надежность в значительной степени зависит от скорости изнашивания верхних поршневых колец, которая определяется вибрационным и напряженно-деформируемым состоянием, а также составом и технологией нанесения износостойких покрытий, позволяющей управлять их структурой.

Одним из основных показателей надёжности является назначенный ресурс, который зависит от износостойкости трущихся пар. Известно, что работа трения поршневых колец составляет до 50% от всей работы трения двигателя [2], причём из всех поршневых колец лишь у верхнего компрессионного кольца наивысшая работа трения. Это связано с работой кольца в условиях высоких температур до 200°С и в режиме полусухого трения. Однако до сих пор действительный ресурс верхних поршневых колец значительно ниже долговечности других деталей ЦПГ ДВС. Так, широко применяемый гальванический способ нанесения хрома на рабочую поверхность поршневых колец всего лишь на 30% снижает

интенсивность изнашивания по сравнению с нехромированными кольцами, что явно недостаточно особенно при повышенных давлениях сгорания в цилиндре, характерных для форсированных ДВС [4]. С повышением уровня форсирования ДВС прежние технологии нанесения износостойких покрытий на поршневые кольца пористым хромом в меньшей степени удовлетворяют возросшим требованиям к покрытиям в условиях более высоких температур и давлений.

В последнее время широкое распространение в технике получил прогрессивный способ упрочнения рабочей поверхности деталей машин, основанный на использовании энергии низкотемпературной плазмы – плазменное нанесение покрытий. Однако в литературе содержится недостаточное количество сведений о влиянии данного способа на основные параметры поршневых колец (форму контура, упругость, эпюр радиальных давлений и др.). Таким образом, исследование вибрационного и напряженно-деформируемого состояния, а также разработка новых технологий нанесения износостойких покрытий на поршневые кольца при работе в условиях повышенных максимальных давлений сгорания, является актуальной проблемой, решение которой позволит выявить резерв в повышении качества поршневых колец с плазменными покрытиями.

Несомненным условием нормальной работы поршневых колец с износостойким покрытием является прочность контакта покрытия с основой. В условиях работы поршневого кольца в двигателе в области адгезионного контакта возникают напряжения, связанные с действующими на кольцо внешними силами и высокой температурой. Для оценки возникающих напряжений была рассмотрена плоская задача термонапряженного состояния поперечного сечения поршневого кольца с покрытием, осажденным в трапециевидную канавку, под действием внешних нагрузок и повышенной температуры, моделирующих реальные условия работы поршневого кольца в двигателе. Данная задача решалась численно на основе графовой модели упругого тела [3, 6].

В результате расчета поля напряжений в рамках такого подхода было получено распределение нормальных и касательных напряжений σ_x, σ_y и τ в поперечном сечении поршневого кольца, отнесенных к системе координат, оси которой выбраны параллельно поверхности дна канавки и перпендикулярно к ней. Однако эти напряжения пригодны для оценки напряженного состояния адгезионного контакта лишь в области дна канавки.

В области стенок необходимо пользоваться напряжениями $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$ и τ', отнесенными к системе координат, повернутой относительно исходной на такой угол φ, чтобы одна из ее осей стала перпендикулярной плоскости стенки канавки.

Поскольку напряжения σ_x, σ_y и τ являются компонентами симметричного тензора второго ранга [1], величины $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$ и τ' выражаются через них в соответствии с формулами преобразования компонент тензора второго ранга при преобразовании координат. В данном случае рассматривается поворот системы координат на угол φ, т.е.

$$\sigma'_x = \sigma_x \cos^2\varphi - 2\tau \sin\varphi \cos\varphi + \sigma_y \sin^2\varphi; \quad (1)$$

$$\tau' = (\sigma_x - \sigma_y)\sin\varphi\cos\varphi + \tau(\cos^2\varphi - \sin^2\varphi); \quad (2)$$

$$\sigma'_y = \sigma_x \sin^2\varphi + 2\tau \sin\varphi \cos\varphi + \sigma_y \cos^2\varphi. \quad (3)$$

Таким образом, для адекватной оценки напряженного состояния основы и покрытия в области адгезионного контакта следует использовать в качестве адгезионных ($\sigma_{адг}$) напряжениями σ_x – на дне канавки и σ'_x – на ее стенках, в качестве когезионных ($\sigma_{ког}$) – σ_y и σ'_y, а в качестве сдвиговых (τ) – напряжениями τ и τ' соответственно.

На рис. 1 представлены результаты расчета, выполненного для чугунного поршневого кольца с молибденовым плазменным покрытием толщиной h = 300 мкм для температуры T = 800 К. Анализ полученных зависимостей показывает, что при приближении к углам канавки нормальные и сдвиговые адгезионные напряжения резко возрастают, причем в данном случае их величины превышают предел адгезионной прочности контакта молибденового плазменного покрытия с чугунной основой, что означает отслаивание покрытия в данных условиях (что и наблюдается на практике). Из зависимости пристеночных напряжений от угла наклона стенок канавки следует, что в практически важном случае, когда покрытие характеризуется меньшим коэффициен-

том теплового расширения, чем основа, при более пологих стенках канавки из возникающих напряжений более существенны касательные, а при более крутых – нормальные адгезионные напряжения.

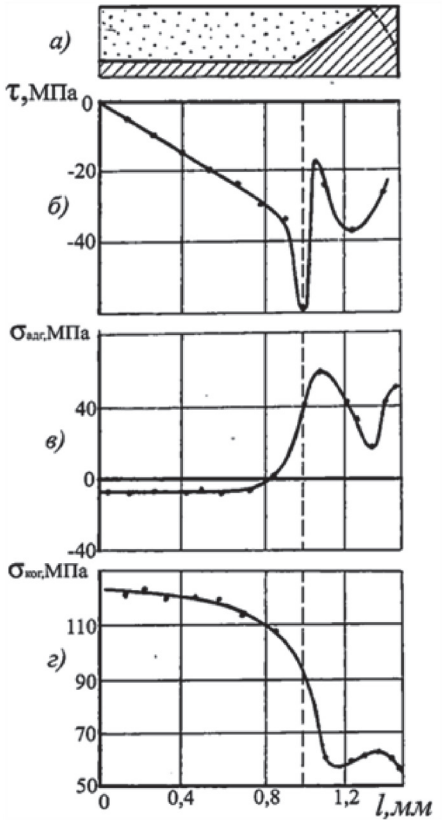

Рис. 1. Распределение напряжений вдоль адгезионного контакта: а – поперечное сечение покрытия в канаве; б – сдвиговых; в – нормальных адгезионных; г – нормальных когезионных

С целью оценки эффективности введения подслоя с промежуточным значением коэффициента теплового расширения перед нанесением покрытия была поставлена задача о нахождении поля напряжений в поперечном сечении чугунного кольца с молибденовым покрытием, нанесенным на хромовый подслой, осажденный в трапециевидную канавку.

Описанным выше численным методом задача была решена для различных толщин подслоя. Из полного поля напряжений, полученного при каждом значении толщины h подслоя, для анализа выбирались величины наиболее опасных касательных напряжений на границе с покрытием.

Изменение касательных напряжений по направлению от основы к покрытию (рис. 2) поясняет выбор величины опасных напряжений τ^*

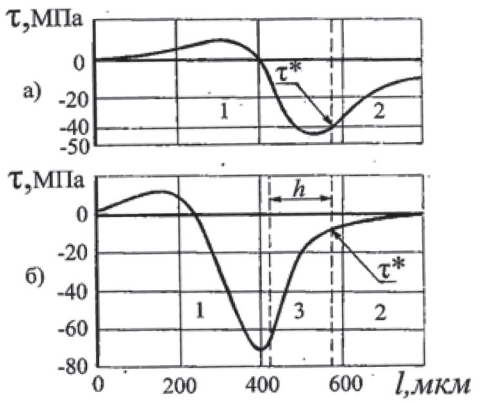

Рис. 2. Касательные напряжения в материале системы «чугун-подслой-молибденовое покрытие» в направлении от основы к покрытию при T = 800 К: а – без подслоя; б – с хромовым подслоем; 1 – чугун; 2 – покрытие; 3 – подслой; τ – сдвиговые напряжения в адгезионном контакте*

Зависимость величины опасных напряжений τ^* от толщины подслоя h показана на рисунке 3, из которого видно, что в данном случае для обеспечения требуемой адгезионной прочности достаточной является толщина подслоя, равная h = 50…100 мкм.

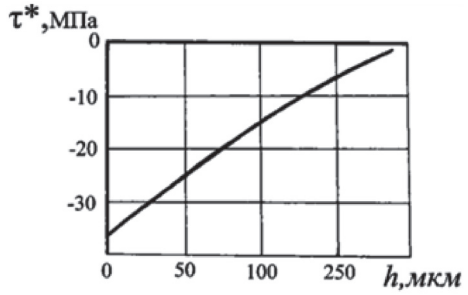

Рис. 3. Влияние толщины подслоя на уровень сдвиговых напряжений в адгезионном контакте

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что нанесение подслоя такой толщины позволяет предотвратить отслаивание молибденового плазменного покрытия от основы.

Выводы

1. Анализ результатов исследований показывает, что метод плазменного нанесения износостойких покрытий можно использовать как для упрочнения новых, так и для восстановления изношенных поршневых колец, но при этом технологический процесс требует использования более сложного оборудования.

2. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что использование молибденового плазменного покрытия, нанесенного на рабочую поверхность чугунной основы поршневых колец, по сравнению с гальваническим способом нанесения хрома, позволяет увеличить адгезионную прочность сцепления и упругие свойства колец с износостойким слоем, повысить коррозионную и адгезионную стойкость при высоких температурах, а также снизить износ поршневых канавок в 2,5…3 раза.

3. Разработанная технология нанесения плазменных покрытий на чугунные поршневые кольца обеспечивает повышение их долговечности и износостойкости по сравнению с традиционным хромированием.

Список литературы

1. Борисенко А.И. Векторный анализ и начала тензорного исчисления / А.И. Борисенко, И.Е. Тарапов. – 3-е изд. – М.: Изд-во Медиа, 2012. – 127 с.

2. Бурштейн Л.М. Основы расчетов смазки и трения поршневого кольца / Л.М. Бурштейн, С.В. Кобяков // Двигателестроение. – 1985. – № 3. – С. 6 – 9.

3. Кузовков Е. Г. Графовая модель упругой среды в осесимметричной постановке / Е.Г. Кузовков, А.А. Тырымов // Сборник научных трудов, 4(21). – Новосибирск, 1990. – С. 103 – 109.

4. Мяконьков М.Б. Совершенствование технологии нанесения износостойких покрытий на поршневые кольца судовых дизелей с учетом их вибрационного и напряженно-деформированного состояния: дис... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2012. – 135 с.

5. Пищаев О.А. Методика расчёта термонапряжённого состояния корпусных деталей и поршней двигателя внутреннего сгорания: дис... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2006. – 115 с.

6. Тырымов А.А. Графовый подход при построении конечно-элементной модели упругих тел при осесимметричном деформировании / Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2012, т. 12, № 4, с. 96 – 106.

7. Шульженко Н.Г. Развитие расчетных моделей для исследования теплового и термонапряженного состояний составных поршней ДВС / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Н.Г. Гармаш, Т.В. Протасова // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 2. – С. 95 – 99.